

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE
FLUIDOS



**CARACTERIZACIÓN DE
COCINA SOLAR HOTPOT**

Autor: DAVID FERNÁNDEZ JUÁREZ

Tutor: ANTONIO LECUONA NEUMANN

Leganés, septiembre de 2015

Agradecimientos

A Jacinta, mi madre, gracias por estar siempre ahí, por preocuparte, por apoyarme, por quitarte tú los caprichos para que los tengamos nosotros, por haberme facilitado la educación y los estudios que hoy tengo.

A Tirso, mi padre, gracias por haberme enseñado el valor de las cosas, a que las cosas sólo se pueden conseguir con esfuerzo y trabajo, por haberme facilitado la educación y los estudios que hoy tengo.

A Amelia, mi hermana mayor, gracias por estar ahí cuando se te necesita, por tus detalles, por cómo nos cuidas.

A María, mi hermana pequeña, gracias por esa alegría que contagias, por nuestra rivalidad para ver quien saca mejores notas que me ha hecho mejorar.

A los amigos del barrio, gracias por compartir grandes momentos, por ser compañeros de biblioteca y de ocio, por estar en las buenas y en las malas.

A Antonio Lecuona, mi tutor, gracias por compartir tu conocimiento, por tu disponibilidad inmediata para resolver dudas y contestar correos.

Sin todos ellos, este proyecto no habría sido posible.

Índice general

1.	RESUMEN	8
2.	OBJETIVOS	10
3.	INTRODUCCIÓN	12
3.1.	EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA	13
3.2.	RADIACIÓN SOLAR	14
3.3.	POSICIÓN SOLAR	15
3.4.	LA CRISIS DE LA LEÑA	18
3.5.	APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR	19
4.	COCINAS SOLARES	21
4.1.	HISTORIA DE LA COCINA SOLAR	22
4.2.	TIPOS DE COCINAS SOLARES	23
4.3.	PROYECTOS DE COCINAS SOLARES EN EL MUNDO	32
5.	NORMATIVA ACTUAL	34
5.1.	SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)	35
5.2.	OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA	37
5.3.	COMITÉ EUROPEO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA COCINA SOLAR. PRUEBA ESTÁNDAR (ECSCR)	39
5.4.	DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL	41
6.	DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA COCINA	45
7.	ANÁLISIS DE LAS ÁREAS DE LA COCINA	48
7.1.	ANÁLISIS DEL ÁREA DE RECEPCIÓN DE LA OLLA (A)	49
7.2.	ANÁLISIS DEL ÁREA DE APERTURA (Aa)	50
8.	DATOS EXTRAIDOS DE LOS ENSAYOS DE OTOÑO	65
8.1.	BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DÍAS DE ENSAYO	67
8.2.	HOJAS DE DATOS	67
9.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE OTOÑO	74
9.1.	CÁLCULO DE LAS CAPACIDADES TÉRMICAS	75
9.2.	SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)	78
9.3.	OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA	83
9.4.	DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL	86

9.5.	UNIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	93
10.	SIMULACIÓN PARA EL MES DE JULIO	96
10.1.	DATOS DE PARTIDA	97
10.2.	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN	99
10.3.	COMPROBACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON LOS ENSAYOS HECHOS EL 29 DE JUNIO Y EL 1 DE JULIO	102
11.	DATOS EXTRAIDOS DE LOS ENSAYOS DE VERANO	105
11.1.	BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DÍAS DE ENSAYO	107
11.2.	HOJAS DE DATOS	108
12.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VERANO	115
12.1.	CÁLCULO DE LAS CAPACIDADES TÉRMICAS	116
12.2.	SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)	119
12.3.	OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA	124
12.4.	DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL	127
12.5.	UNIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	134
13.	CONCLUSIONES GENERALES	137
13.1.	COMPARACIONES	138
13.2.	CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS	141
13.3.	TRABAJOS FUTUROS	142
14.	BIBLIOGRAFÍA	143
15.	ANEXOS	145

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de rayos solares.	15
Figura 2. Ángulos solares de un área de colección A_a en el hemisferio Norte.....	16
Figura 3. Mujeres recogen leña para cocinar.....	19
Figura 4. Prueba de cocinas solares en el Chad.....	20
Figura 5. Cocina solar de Horace de Saussure.	22
Figura 6. Bárbara Kerr (izquierda) y Sherry Cole (derecha) con su prototipo de cocina solar.	23
Figura 7. Horno solar casero de cartón.....	24
Figura 8. Condensación en un horno solar.	25
Figura 9. Cocina parabólica modelo BS-M1.	26
Figura 10. Cocina solar con lentes Fresnel.....	26
Figura 11. Luz concentrada en la olla en una cocina parabólica modelo Mariposa.....	27
Figura 12. Cocina de panel fabricada con cartón y papel de aluminio.....	28
Figura 13. Bolsa de plástico usada a modo de cobertor en cocina de panel Cookit.	28
Figura 14. Cocina de panel fabricada con parasol de automóvil.....	29
Figura 15. Cocina Hot Pot durante ensayo en octubre.	29
Figura 16. Esquema de un modelo de cocina solar indirecta. Colectores (derecha) y cocina (izquierda)	31
Figura 17. Cocinas de tipo panel en el campo de refugiados de Iridimi	32
Figura 18. Reflectores situados en el tejado del templo	33
Figura 19. Construcción de cocinas solares (izquierda) y cocina solar en una escuela de Fiarenana (derecha)	33
Figura 20. Partes de la cocina Hot Pot. Olla de acero (izquierda), olla de vidrio (centro) y reflector (derecha).....	46
Figura 21. Proceso de plegado y desplegado del reflector de la cocina Hot Pot.....	46
Figura 22. Olla de metal dentro del cobertor de vidrio.	47
Figura 23. Vista superior (izquierda) y lateral (derecha) de la olla metálica.	49
Figura 24. Detalle de regulación de la inclinación de la cámara en el trípode.....	50
Figura 25. Fotografías usadas para el cálculo del área de apertura de la cocina para distinta altura solar. De izquierda a derecha y de arriba abajo: 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 90°.....	51
Figura 26. Fotografías usadas para el cálculo del área de apertura en función de la altura solar y la desorientación azimutal. De izquierda a derecha y de arriba abajo, altura solar 60° y desorientación azimutal de 7,5°; 15°; 22,5°; 30°.....	54
Figura 27. Interfaz de PVGIS	98
Figura 29. Estado del cielo los días 29 de junio (izquierda), 30 de junio (centro) y 1 de julio (derecha).....	107
Figura 29. Cocina Primrose. Detalle de cobertor inferior (derecha)	140
Figura 31. Vista frontal y trasera del dosímetro de radiación	148
Figura 32. Vista frontal de los termómetros.....	149
Figura 33. Termopar de tipo K.	149

Índice de gráficos

Todos los gráficos son de elaboración propia.

Gráfico 1. Área de apertura frente a altura solar	52
Gráfico 2. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 10°..	55
Gráfico 3. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 20°..	56
Gráfico 4. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 30°..	57
Gráfico 5. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 40°..	58
Gráfico 6. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 50°..	59
Gráfico 7. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 60°..	60
Gráfico 8. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 70°..	61
Gráfico 9. Área de apertura frente a altura solar para distintas desviaciones acimutales.	62
Gráfico 10. Perfil de calentamiento 29/10/2014 (AGUA).	69
Gráfico 11. Perfil de enfriamiento 29/10/2014 (AGUA).	70
Gráfico 12. Perfil de calentamiento 30/10/2014 (VACÍO).	71
Gráfico 13. Perfil de enfriamiento 30/10/2014 (VACÍO).	72
Gráfico 14. Perfil de calentamiento 31/10/2014 (AGUA).	73
Gráfico 15. Perfil de enfriamiento 31/10/2014 (AGUA).	73
Gráfico 16. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 29/10/2014 (AGUA)....	79
Gráfico 17. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 30/10/2014 (VACÍO)....	80
Gráfico 18. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 31/10/2014 (AGUA)....	81
Gráfico 19. Comparación de la potencia normalizada frente a sobre-temperatura para los ensayos de otoño.....	82
Gráfico 20. Evolución de t_0 con el tiempo 29/10/2014 (AGUA).	87
Gráfico 21. Evolución de t_0 con el tiempo 31/10/2014 (AGUA).	88
Gráfico 22. Evolución de AUF' con el tiempo 29/10/2014 (AGUA).	89
Gráfico 23. Evolución de AUF' con el tiempo 31/10/2014 (AGUA).	90
Gráfico 24. Potencia útil normalizada frente a sobre-temperatura en otoño.	93
Gráfico 25. Perfil de calentamiento de las simulaciones de julio.....	100
Gráfico 26. Potencia útil normalizada frente a sobre-temperatura en la simulación....	101
Gráfico 27. Comparación de los perfiles de calentamiento de las simulaciones y los ensayos.	103
Gráfico 28. Perfil de calentamiento 29/06/2015 (AGUA).	110
Gráfico 29. Perfil de enfriamiento 29/06/2015 (AGUA).	110
Gráfico 30. Perfil de calentamiento 30/06/2015 (VACÍO).	111
Gráfico 31. Perfil de enfriamiento 30/06/2015 (VACÍO).	112
Gráfico 32. Perfil de calentamiento 01/07/2015 (AGUA).	113
Gráfico 33. Perfil de enfriamiento 01/07/2015 (AGUA).	114
Gráfico 34. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 29/06/2015 (AGUA)...	120
Gráfico 35. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 30/06/2015 (VACÍO)..	121
Gráfico 36. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 01/07/2014 (AGUA)...	122

Gráfico 37. Comparación de la potencia normalizada frente a sobre-temperatura para los ensayos de verano.....	123
Gráfico 38. Evolución de t_0 con el tiempo 29/06/2015 (AGUA).	128
Gráfico 39. Evolución de t_0 con el tiempo 1/07/2015 (AGUA).	129
Gráfico 40. Evolución de AUF' con el tiempo 29/06/2015 (AGUA).	130
Gráfico 41. Evolución de AUF' con el tiempo 1/07/2015 (AGUA).	131
Gráfico 42. Potencia útil normalizada frente a sobre-temperatura en verano.	134

1. RESUMEN

En este proyecto se lleva a cabo la caracterización experimental de la cocina solar Hot Pot, que permite definir sus características térmicas y de rendimiento mediante las distintas normas de ensayo y parametrización.

Como introducción, se presenta el Sol como fuente de energía, así como los parámetros relacionados con él que nos permiten conocer la radiación que podemos aprovechar y su posición con respecto a nosotros. Además se indican los problemas existentes con la fuente de energía hasta ahora utilizada para cocinar, la leña, y cómo con el Sol se pueden paliar los aspectos nocivos relacionados.

A continuación se hace una pequeña presentación de la historia y los tipos de cocinas solares que existen, así como de los principales proyectos existentes referentes a las cocinas solares.

Antes de entrar en la caracterización, se presentan las principales normas internacionales existentes que nos permiten calcular los parámetros térmicos de la cocina.

El siguiente paso es la caracterización en sí, que consta de:

- Análisis de áreas de la cocina, tanto área de recepción solar como área de apertura como función de la posición relativa del Sol.
- Presentación de los datos obtenidos en los ensayos realizados en otoño y cálculo de los parámetros característicos de la cocina en dichas condiciones.
- Simulación del funcionamiento, partiendo de los parámetros hallados, para verano y comprobación de la validez de la simulación con datos obtenidos en dicha época.
- Presentación de los datos obtenidos en los ensayos realizados en verano y cálculo de los parámetros característicos de la cocina en dichas condiciones.

Para finalizar se realizan las comparaciones entre los parámetros hallados en las distintas condiciones. Además, se comparan estos parámetros con los de otras cocinas.

Como punto final, se presentan posibles trabajos futuros que pueden surgir de este proyecto.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es la caracterización de la cocina Hot Pot obteniendo unos valores de **rendimiento óptico, figuras de mérito normalizadas y potencia normalizada**, según las normativas existentes, que permitan cuantificar el comportamiento térmico de dicha cocina.

Este objetivo principal, se ha dividido en los siguientes sub-objetivos:

- Caracterización de la cocina con bajas temperaturas ambiente y baja elevación solar, realizada en el mes de octubre.
- Simulación 0D del comportamiento de la cocina partiendo de los parámetros anteriores para condiciones de alta temperatura ambiente, realizada para el mes de julio. Comprobación de la validez de los parámetros en estas condiciones.
- Caracterización de la cocina con altas temperaturas ambiente, realizada a finales de junio y principios de julio.
- Una vez caracterizada, se llevan a cabo comparaciones de los parámetros obtenidos tanto con la misma cocina en distintas condiciones, como con otros tipos de cocina. Esto permite ver las diferencias en el funcionamiento de los distintos dispositivos de cocina solar.

3. INTRODUCCIÓN

La alimentación es un proceso necesario para la supervivencia del ser humano. La evolución nos llevó a cocinar los alimentos en vez de ingerirlos crudos. El proceso de cocinado se basa, básicamente, en el aumento de la temperatura de los alimentos con la finalidad de que éstos adquieran las propiedades necesarias para facilitar su ingesta y proveernos de los nutrientes necesarios sin riesgos para la salud.

Las cocinas solares hacen uso de la energía proveniente del Sol para aumentar la temperatura de los alimentos. Esto supone un avance tecnológico en cuanto al uso de energías renovables. Además, facilita el acceso de energías limpias y económicas en las zonas más desfavorecidas. Esto supone una mejora para el medio ambiente y para la salud debido a la reducción del uso de leña, principal combustible para cocinar en las zonas desfavorecidas.

3.1. EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA

El Sol es una estrella que se encuentra en el centro del Sistema Solar. Es la fuente de la mayor parte de la energía sobre la Tierra. Básico en la alimentación de las plantas por medio de la fotosíntesis, proceso gracias al cual se convierte la energía solar en energía química. Es la causa de la variación del tiempo atmosférico y del ciclo del agua. Es el origen de la luz y el calor que hace posible la vida. Así mismo, la mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol.

La energía del Sol proviene de su núcleo donde, debido a las condiciones extremas de presión y temperatura, la materia, principalmente átomos de hidrógeno, lleva a cabo reacciones nucleares de fusión para formar átomos más pesados transformando parte de la masa existente en energía. La materia se mueve naturalmente de los lugares calientes a los fríos; esto facilita que la energía se transporte hacia fuera del Sol.

Las dimensiones solares son muy superiores a las de la Tierra. El radio del Sol es de 695.800 km, unas 110 veces mayor que el de la Tierra. La distancia entre el Sol y la Tierra es, aproximadamente, 149.600.000 km. La temperatura superficial del Sol se encuentra en torno a los 5.500 °C. Tras salvar la distancia hasta la Tierra, en la parte superior de la atmosfera se obtiene una energía proveniente del Sol de 1.367 W/m² de media.

La energía consumida mundialmente en un año es, aproximadamente, un 0,025 % del total de la energía solar que llega a la superficie terrestre en el mismo periodo de tiempo. Esto hace que el aprovechamiento de la energía solar se deba tener en cuenta.

3.2. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es una energía electromagnética con distintas longitudes de onda cuyo espectro va desde el infrarrojo (IR) hasta el ultravioleta (UV) pasando por el visible (VIS). Tras salir del Sol, la radiación solar que llega al exterior de la Tierra sufre una serie de transformaciones al atravesar la atmosfera antes de llegar a la superficie terrestre.

La primera transformación que encontramos es la absorción. De forma directa, la radiación ultravioleta dañina va a ser absorbida en la capa de ozono. Además, la banda de infrarrojos también se ve afectada por la absorción debido a gases como el dióxido de carbono y el vapor de agua.

Tras considerar los rayos que no inciden en la superficie terrestre, se pasa a clasificar los incidentes en dicha superficie.

Parte de la radiación solar incidirá directamente en la superficie terrestre, sin verse afectada por los fenómenos de reflexión o refracción en su travesía desde el foco solar. Esta componente recibirá el nombre de radiación directa. Aunque no sea apreciable a simple vista, no toda la radiación va a ser directa. En un día despejado, la radiación directa puede llegar a ser el 90% de la radiación global.

Los fenómenos de reflexión y refracción, a los que se hacían referencia anteriormente, son los causantes del segundo tipo de radiación solar incidente, la radiación difusa proveniente del cielo. Debido a la presencia de partículas moleculares y en suspensión en la atmósfera, se produce una desviación de los rayos solares en todas las direcciones, pero no homogéneamente. Esto no impide a esta parte de la radiación llegar a la superficie terrestre, pero no llegará con una dirección fija como la radiación directa sino con una dirección aleatoria, por lo que la radiación difusa se considera muy frecuentemente omnidireccional. Esta parte de la radiación presenta el problema de no ser concentrable ópticamente y eso hace que sea inservible para ciertos aparatos que aprovechan la energía solar, como pueden ser algunos tipos de cocinas solares.

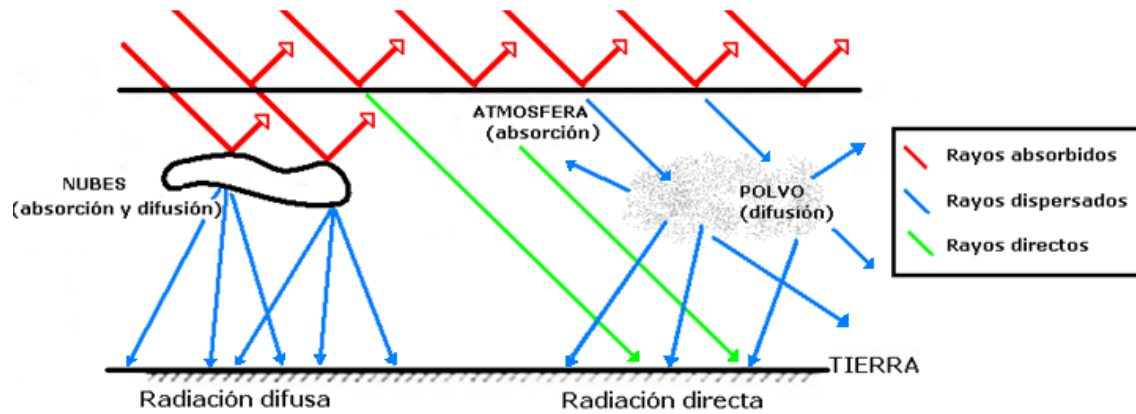


Figura 1. Tipos de rayos solares.

Fuente: Tema 4: Radiación solar. Energías renovables. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. UC3M.

Tras llegar a la superficie terrestre, la radiación, tanto directa como difusa, es en parte absorbida por el suelo, el agua y los distintos organismos. Parte de esta energía se refleja hacia la atmósfera y otra parte se re-irradia en forma de calor, en el espectro infrarrojo. Será considerada como radiación difusa procedente del suelo.

El estudio de la radiación se hace de forma conjunta con la radiación directa y la difusa. Así la suma de estas dos componentes nos dará la radiación global.

3.3. POSICIÓN SOLAR

Por su importancia en el comportamiento de las cocinas solares, se requiere parametrizar la posición solar en el firmamento.

Aunque el Sol se mantiene estático, la apariencia desde la Tierra, es que se mueve. Esto es debido a los movimientos de la Tierra respecto al Sol. Así, desde nuestra perspectiva podemos determinar que el Sol sale por el Este y se pone por el Oeste. Para determinar la posición del Sol, se hace uso de una herramienta llamada hora solar, que determina las 12:00 horas para el punto de máxima altura del Sol sobre el horizonte, conocido como cénit. Esta hora solar guarda cierta relación con la hora oficial, que no es más que un convenio estatal. La hora oficial se asocia a un meridiano de referencia (θ_{ref}). La relación entre la hora solar y la hora oficial es la siguiente:

$$hora\ solar = hora\ oficial + 240 \left(\frac{S}{Q} \right) \cdot (\theta_{ref} - \theta) + E - A$$

Donde θ es la longitud del lugar donde se quiere calcular la hora solar.

A es el adelanto de la hora oficial que se hace en verano o invierno en los diferentes países con la finalidad, entre otras, de obtener un mayor aprovechamiento solar.

E se determina por la ecuación del tiempo que tienen en cuenta el movimiento no uniforme de la Tierra:

$$E = 13,752 s[0,075 + 1,868 \cos(B) - 37,077 \sin(B) - 14,615 \cos(2B) - 40,89 \sin(2B)]$$

Donde $B = (d - 1) \cdot \frac{360}{365}$, siendo d el día del año desde 1 hasta 365.

Además de la hora solar, otros parámetros que nos ayudan a determinar la posición del Sol son los ángulos que se indican a continuación, algunos de los cuales se pueden ver en la siguiente figura. Estos ángulos están considerados para el hemisferio Norte.

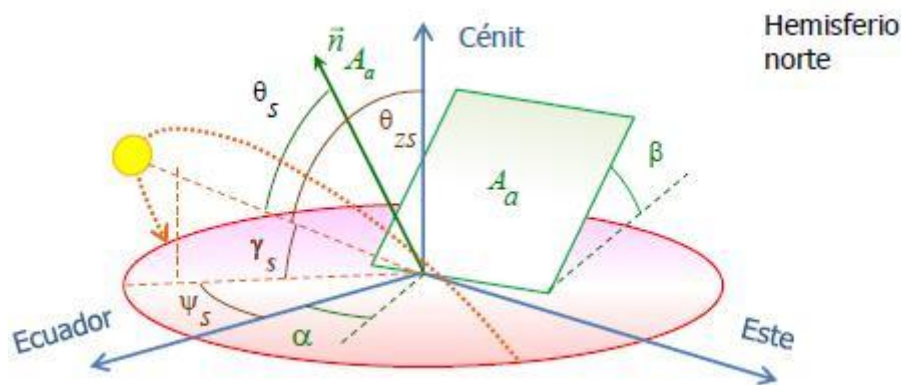


Figura 2. Ángulos solares de un área de colección A_a en el hemisferio Norte.

Fuente: Antonio Lecuona, 2012. Fundamentos de cocinas solares

- Declinación (δ): ángulo que forman la dirección de los rayos solares con el plano del ecuador. Este ángulo varía sinusoidalmente entre $\pm 23,45^\circ$. Se define positivo para el hemisferio norte y negativo para el sur. La forma de calcular este ángulo se basa en la siguiente relación:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \frac{284 + d}{365}\right)$$

Donde d es el día del año que va desde 1 hasta 365.

- Ángulo horario (ω): indica el desplazamiento angular del Sol en el plano de la trayectoria solar. El origen del ángulo se toma en el cenit o mediodía solar y se consideran valores positivos en el sentido del desplazamiento del Sol.

$$\omega = 360^\circ \cdot \frac{\text{hora solar} - 12h}{24h}$$

- Latitud (ϕ): distancia angular entre el ecuador y un punto determinado del planeta, medido a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto. Según el hemisferio, se considera latitud norte o sur.
- Ángulo cenital (θ_{zs}): ángulo que forman los rayos solares respecto a la vertical en un punto determinado. Depende de la hora, el día del año y la latitud.

$$\cos\theta_{zs} = \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin\phi$$

- Altura solar (γ_s): ángulo que forman los rayos solares respecto a la horizontal local. Es el ángulo complementario del ángulo cenital.
- Ángulo azimutal (ψ_s): ángulo que forma la proyección del Sol sobre el plano horizontal con la dirección sur. Al mediodía solar su valor es 0° .

Para determinar la posición del área de colección, que va a hacer uso de la radiación solar, también se usan una serie de ángulos.

- Inclinación del área de colección (β): ángulo que forma el área de colección con la superficie horizontal.
- Acimut del área de colección (α): ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular al área de colección con la dirección sur.

3.4. LA CRISIS DE LA LEÑA

Cocinar es una actividad que requiere un enorme gasto energía, ya que es una actividad que se lleva a cabo a diario.

En los países desarrollados, cocinar no plantea un reto serio debido al buen suministro energético del que se dispone. El problema se plantea en los países subdesarrollados o en vías de desarrollo. En estos países, el suministro energético es muy deficiente sobre todo en las zonas rurales, lo que hace que más de 2.000 millones de personas dependen de la leña para cocinar. En los países subdesarrollados el consumo eléctrico es 150 veces menor que en los desarrollados y la electrificación rural se sitúa en torno al 5%.

Como se ha indicado anteriormente, la solución al desabastecimiento energético en estos países para cocinar es la leña. Este problema afecta a casi un tercio de la humanidad. En estas zonas, el consumo energético asociado a cocinar es 80% del consumo energético total.

Desde el punto de vista energético, el uso de leña para cocinar es tremendamente ineficiente. De toda la energía liberada por la leña en la combustión, sólo un 5% se aprovecha en una cocina de fuego a tierra. Usando métodos más elaborados como puede ser un horno de leña, esta cifra sube hasta el 25%, que aún es considerablemente baja.

La situación no mejora desde el punto de vista de las emisiones de contaminantes. El 50% de la madera que se recoge en todo el planeta es usada para cocinar. De esta madera proviene el 15% de las emisiones totales de CO₂ en el planeta.

Asociado a las emisiones de contaminantes, se presenta el problema de las enfermedades debidas al uso de la leña. Las principales enfermedades asociadas a la leña son las respiratorias debidas a la inhalación de agentes nocivos. Éstas afectan principalmente a las mujeres que cocinan.

Otro problema que se presenta por el uso de leña es la de su recolección, siendo las mujeres y los niños los principales recolectores. Se estima que las mujeres dedican entre 1 y 5 horas al suministro de leña. Esto es debido a las distancias a cubrir, a pie, hasta los lugares donde se encuentra la madera. Además debido a la lenta reforestación, las distancias a cubrir se hacen cada vez mayores y más peligrosas.



Figura 3. Mujeres recogen leña para cocinar.

Fuente: ACNUR/ J. Ose

La deforestación también es muy abundante en estas zonas, por ejemplo en Haití se estima que el 98% de los árboles han sido talados para hacer fuego y cocinar. Los problemas asociados a la deforestación son numerosos. El primero es el déficit de leña para las personas que la necesitan, ya que el consumo crece más rápidamente que la reforestación. Este déficit, está convirtiendo la leña en un producto caro y en muchas ocasiones de mayor valor que la comida. Además, se facilita la erosión y desertización de los terrenos.

3.5. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

Como se ha podido observar, el uso de la leña para cocinar presenta bastantes inconvenientes. Por ello se han de encontrar alternativas que permitan cocinar de forma más limpia en las zonas más desfavorecidas. La solución tecnológica que se ha encontrado ha sido el aprovechamiento de la energía solar para cocinar, por medio de las cocinas solares. En la mayoría de estos territorios, la radiación solar es aceptable e incluso alta, lo que permite el aprovechamiento de la energía solar una media de 250 días al año.



Figura 4. Prueba de cocinas solares en el Chad.

Fuente: MAGIS Italy.

Las cocinas solares presentan ventajas económicas, ya que el coste del combustible para cocinar puede no ser asumible para muchas familias. Además, desde el punto de vista ecológico, la energía solar es una energía limpia que no emite contaminantes. Su sustitución por la leña disminuiría la deforestación y desertización. Desde la perspectiva social, con el uso de cocinas solares, las familias no tendrían que afrontar gastos de combustible pudiendo destinar ese dinero a comida, medicinas y productos de primera necesidad.

Obviamente, las cocinas solares no son sólo ventajas. Uno de los problemas a resolver es el de conseguir un modelo de cocina que se adapte a cada lugar, con tamaños y capacidades adecuadas, con materiales seguros, fáciles de usar y de bajo coste con el fin de que sean accesibles a personas con pocos recursos.

Sin lugar a dudas, la principal desventaja que presenta la energía solar es su naturaleza intermitente frente a la necesidad diaria e intradiaria de cocinar. Esto hace que sea difícil adoptarla como solución a los problemas que presentan las técnicas tradicionales. Aun así, el aprovechamiento de la energía solar para cocinar podría reducir sustancialmente los recursos energéticos destinados a este fin, produciendo un impacto positivo en la economía de los países en vías de desarrollo.

El uso de la cocina solar no se limita únicamente al proceso de cocinado. Las cocinas pueden ser aprovechadas para hervir agua para beber, lo que proporcionaría el acceso a agua potable a millones de personas, previniendo las enfermedades transmitidas por los agentes patógenos presentes en el agua antes de su esterilización.

4. COCINAS SOLARES

4.1. HISTORIA DE LA COCINA SOLAR

La primera referencia al aprovechamiento de la energía solar data del siglo III a.C. durante la batalla de Siracusa. En ella, Arquímedes diseñó unos espejos hexagonales hechos de bronce para reflejar los rayos solares y concentrarlos en las velas de los barcos enemigos con el fin de incendiarlas.

Pero no es hasta 1767 cuando aparece la primera cocina solar. El físico suizo-francés Horace de Saussure monta sobre una mesa negra hasta 5 cajas de vidrio transparente, concéntricamente una dentro de la otra. Con este ingenio, logra llegar a temperaturas de más de 85°C que le permiten cocer la fruta. Más adelante, mejoró el diseño de su cocina mediante el uso de lana a modo de aislante entre las paredes de la cocina, obteniendo unas temperaturas de hasta 110°C.

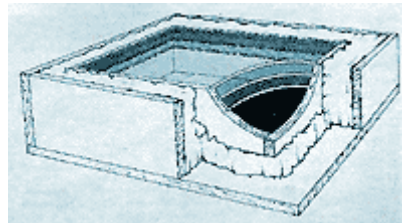


Figura 5. Cocina solar de Horace de Saussure.

Fuente: <http://www.terra.org/categorias/comunidad-cocina-solar/historia-de-la-cocina-solar>, Accedido en febrero de 2015.

A pesar del invento, no se vuelve a tener constancia de una cocina solar hasta 1830 cuando el astrónomo inglés John Frederick Herschel hace uso de una caja de color negro fabricada con madera y una ventana de doble cristal sin reflector para cocinar en una expedición al Cabo de Buena Esperanza en Sudáfrica.

Tras estos y otros pioneros, el verdadero desarrollo de las cocinas solares no inicia hasta el siglo XX durante la época de los 50. En esta década, la Administración de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) se encargó de medir la capacidad de las primeras cocinas parabólicas que habían sido desarrolladas en la India junto con algunos prototipos de hornos diseñados hasta la fecha.

El mayor empujón en el desarrollo de la cocina solar viene de la mano de Bárbara Kerr y Sherry Cole quienes desarrollaron el primer modelo de cocina solar de caja válido y eficiente en 1973.



Figura 6. Bárbara Kerr (izquierda) y Sherry Cole (derecha) con su prototipo de cocina solar.

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Barbara_Kerr, Accedido en febrero de 2015

Aunque el desarrollo y la utilización de las cocinas solares no cesan, en la década de los 80 es cuando se produce un verdadero impulso y se multiplica el uso de estas cocinas en el mundo. Esto fue en parte debido a que la FAO estimó que una cuarta parte de la humanidad sufría la escasez de leña destinada a cocinar alimentos y predijo que para el año 2000 la escasez podría afectar a la mitad del total. Fue por esto, por lo que se consideró la cocina solar como una alternativa a la cocina con leña, sobre todo en los países subdesarrollados.

4.2. TIPOS DE COCINAS SOLARES

Debido a las distintas condiciones meteorológicas de los distintos lugares donde se puede hacer uso de una cocina solar, han aparecido distintos modelos de éstas. Cada uno de estos modelos tiene sus características particulares pero se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios.

El criterio básico de la clasificación es el uso directo o indirecto que hacen de la radiación solar para calentar el alimento. Así, tendremos cocinas solares **directas**, si la radiación solar se aprovecha para calentar el alimento directamente, e **indirectas**, si no es así. Además, se añade un tipo más como son las cocinas solares de **almacenamiento**.

4.2.1. Cocinas solares directas

El principio básico de funcionamiento es el uso de la radiación solar directamente para calentar el alimento. Este tipo de cocinas son las más comunes y es por ello que hay distintos modelos que se pueden clasificar en los siguientes tipos:

4.2.1.1. Hornos solares o cocinas de caja

Son cajas hechas de material aislante en las que uno o varios de los lados son cristales que permiten el paso de la radiación solar. Estos cristales provocan en el interior un efecto invernadero que hace que se caliente el aire del interior. Esto se produce gracias a que el vidrio permite el paso de la radiación solar de onda más corta, pero no el de la radiación de onda larga que emiten los objetos calentados en el interior.

Este tipo de cocina presenta la ventaja de su sencillez y su bajo coste. Se pueden ensamblar fácilmente o comprar fabricados. Mantienen la comida caliente durante un tiempo elevado debido al aislamiento de sus paredes. Debido a su diseño, no presenta riesgos de provocar incendios y su forma cerrada evita las quemaduras y daños físicos al usuario.



Figura 7. Horno solar casero de cartón.

Fuente: <http://solarcooking.org/espanol/minspan.htm>, Accedido en febrero de 2015

Además, su uso es muy sencillo debido a que no es necesaria la reorientación para seguir el Sol, salvo las que incorporan un espejo externo, como en la Figura 7. Otra ventaja es el aprovechamiento de la radiación difusa lo que le permite funcionar con nubosidad relativamente elevada.

Por el otro lado, presenta el inconveniente de la condensación de vapor de agua en el interior provocada por la forma del aislamiento. Esto afecta a la transferencia de la radiación y provoca corrosión en las paredes internas. Además, debido a su diseño, no permite el acceso al interior durante el cocinado.



Figura 8. Condensación en un horno solar.

Fuente: <http://www.sitiosolar.com/utiles%20solares.htm>, Accedido en febrero de 2015

El tiempo de cocción en este tipo de cocina, es bastante largo. Esto puede ser una ventaja o un inconveniente dependiendo de los criterios que se tengan en cuenta.

4.2.1.2. Cocinas de concentración o reflectantes

Este tipo de cocinas basan su funcionamiento en la concentración de la radiación solar en el fondo de una olla. Generalmente, como concentrador se usa una parábola y ese es el motivo por el que suelen ser conocidas como cocinas parabólicas.



Figura 9. Cocina parabólica modelo BS-M1.

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/BS-M1_Solar_Cooker, Accedido en febrero de 2015

Hay distintos tipos de concentradores parabólicos que pueden ser profundos, asimétricos, plegables, etc. Pero también pueden usarse concentradores no parabólicos como cilíndricos, esféricos, con espejo o con reflectores de lentes de Fresnel.



Figura 10. Cocina solar con lentes Fresnel

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Twin_Fresnel_Cooker, Accedido marzo de 2015

Todas estas geometrías concentran la luz en un punto focal de la cocina y es en ese punto donde se sitúa la olla.



Figura 11. Luz concentrada en la olla en una cocina parabólica modelo Mariposa

Fuente:

http://solarcooking.wikia.com/wiki/File:Butterfly_Community_Solar_Cooker.jpg,

Accedido en marzo de 2015

La principal ventaja que presentan estas cocinas es la temperatura que alcanzan a causa de la mayor área de apertura a los rayos solares y la menor área de pérdidas de calor. Esto permite que en ellas se puedan freír alimentos. Esta temperatura aumenta si como material en el reflector se usan espejos o lentes.

Su principal inconveniente es su elevado coste que hace que sea difícil adquirirlas en zonas con escasos recursos económicos. Suelen ser de gran tamaño lo que dificulta su manejo y ajuste para la reorientación. Sólo aprovecha la radiación directa, que es la única que se puede concentrar, lo que provoca que sólo pueda ser usada bajo nubosidades mínimas o inexistentes. Debido a su tamaño, también se ve afectada por los vientos que podrían arrastrarla.

4.2.1.3. Cocinas de panel

Este tipo de cocina es la forma más simple y económica de cocinar con la ayuda del Sol. La estructura más simple de estas cocinas está formada por cartón y papel reflectante, generalmente papel de aluminio.



Figura 12. Cocina de panel fabricada con cartón y papel de aluminio.

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Category:Solar_panel_cooker_designs,
Accedido en marzo de 2015

El principio de funcionamiento de estas cocinas es una mezcla de los dos tipos anteriores. Por un lado, se realiza una concentración de los rayos solares en la zona donde se ubica la olla. Por otro lado, se hace uso de la acumulación de calor aunque no directamente con la estructura de la cocina. Para ello se hacen uso de cobertores sobre la olla que hacen de acumuladores de calor y reducen las pérdidas. Estos cobertores pueden ser desde bolsas de plástico hasta dos ojos de lavadora colocados de forma opuesta con la olla en su interior.

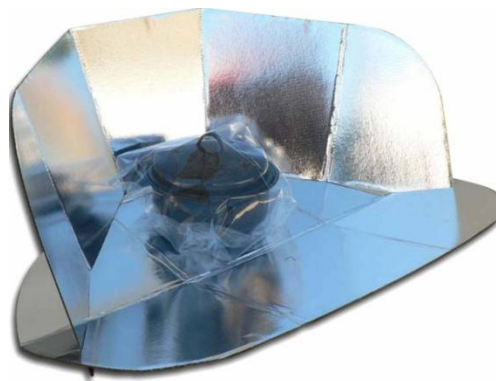


Figura 13. Bolsa de plástico usada a modo de cobertor en cocina de panel Cookit.

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Category:Solar_panel_cooker_designs,
Accedido en marzo de 2015

Por ello, las principales ventajas que presentan estas cocinas es su bajo coste, manejabilidad y que no se ven excesivamente afectadas por la nubosidad moderada. Además, la reorientación de la cocina se debe hacer cada hora, aproximadamente, por lo que no se necesita una atención elevada.

No obstante, las temperaturas alcanzadas en este tipo de cocinas rondan los 100°C y presentan tiempos de cocción más lentos que los hornos solares. Además, su bajo peso es una ventaja para su transporte pero un gran inconveniente en presencia de vientos.

Las formas y materiales de este tipo de cocinas son muy variados. En cuanto a los materiales podemos encontrar cartón, plástico e incluso aluminio.



Figura 14. Cocina de panel fabricada con parasol de automóvil.

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Category:Solar_panel_cooker_designs,
Accedido en marzo de 2015

El uso de aluminio en el reflector es el caso de la cocina objeto de este proyecto, la cocina Hot Pot.



Figura 15. Cocina Hot Pot durante ensayo en octubre.

Fuente propia

La cocina Hot Pot fue desarrollada por Household Energy Inc a partir de una sencilla cocina de panel. En ella se sustituyen los paneles de cartón por paneles de aluminio unidos por bisagras de piano, que permiten plegarla y reducir considerablemente el tamaño del reflector para el almacenamiento. Esta cocina es sólo manufacturada en México por una empresa privada en cooperación con el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza.

4.2.2. Cocinas solares indirectas

El principio de funcionamiento de estas cocinas es el uso indirecto de la radiación solar para cocinar alimentos.

Generalmente, este tipo de cocinas disponen de dos partes, la primera son unos colectores solares, encargados de la recogida de la radiación solar, y la segunda es una cocina, donde se tratan los alimentos.

La radiación solar incide en los colectores calentando el fluido que va por el interior de éstos. Este fluido es bombeado hacia el interior donde mediante un serpentín se calienta la olla que contiene los alimentos. Adicionalmente, se puede introducir un intercambiador de calor intermedio, de manera que el fluido de los colectores sea distinto al que calienta la olla y se puedan evitar posibles intoxicaciones.

La introducción de este intercambiador intermedio es beneficiosa ya que permite usar agua con aditivos, que le confieren temperaturas de ebullición mayores, o anticongelantes en el circuito de los colectores. Así se evitan problemas por ebullición en los conductos o congelación cuando la cocina no está en uso.

Las temperaturas alcanzadas en la cocina dependerán de los colectores usados, siendo la temperatura máxima en torno a 200°C, obviamente, usando aceite térmico.

Las ventajas que presentan este tipo de cocinas son principalmente los tiempos de cocción bajos, capacidad de cocinar grandes cantidades de alimento, regular la temperatura de cocción y la capacidad de almacenar calor en un tanque. Se pueden usar tanto con radiación directa como difusa (sin concentración) y no presenta riesgos relacionados con la exposición a la radiación.

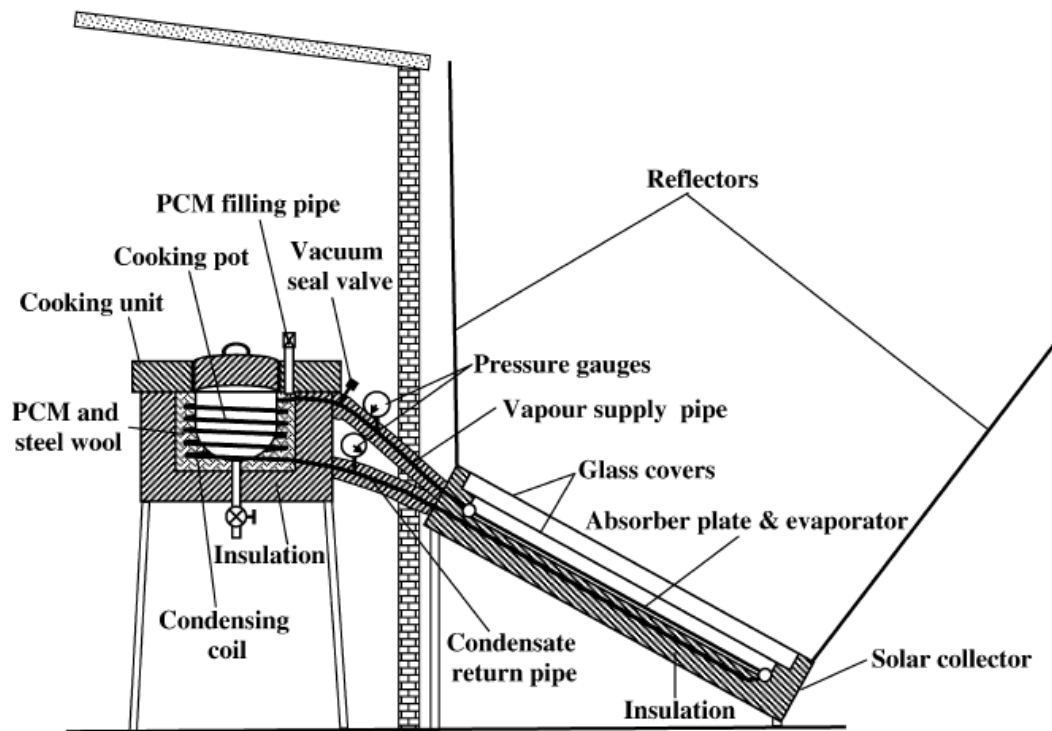


Figura 16. Esquema de un modelo de cocina solar indirecta. Colectores (derecha) y cocina (izquierda)

Fuente: H.M.S. Hussein, H.H. El-Ghetany, S.A. Nada: “Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit”, Energy Conversion and Management, Volumen 49

Por el contrario, debido a la complejidad de la instalación y de elementos como los colectores, el precio es elevado. Esto provoca que no esté al alcance de muchos usuarios potencialmente interesados.

4.2.3. Cocinas solares de almacenamiento

El principio de funcionamiento de este tipo de cocinas es el aprovechamiento de la radiación solar con el fin de calentar un material del cual, posteriormente, se aprovechará esa energía obtenida para cocinar.

Generalmente, los materiales usados para almacenar la energía solar son materiales de cambio de fase (PCM). Éstos se funden al Sol, cargándose de energía. Tras esto, se guardan en un cobertor con aislamiento térmico para mantener la mayor cantidad de energía posible. Para cocinar, se inserta la olla con el alimento en el material y éste cede calor solidificándose. Este proceso permite hacer uso de energía solar para cocinar por

la noche o por la mañana temprano cuando la radiación solar no es suficiente para aprovecharla directamente.

4.3. PROYECTOS DE COCINAS SOLARES EN EL MUNDO

Tras conocer la historia y los distintos tipos de cocinas solares, en este apartado se presentan algunos proyectos que se han llevado a cabo con el fin de implantar este tipo de cocinas como solución a los problemas presentados con anterioridad.

4.3.1. Chad

Más de 50.000 personas en campos de refugiados del Este de Chad usan cocinas solares de tipo panel fabricadas por ellos mismos. Esta iniciativa de Tchad Salaire, British NGO CORD, Jewish World Watch y Kozon Foundation permite cocinar a las familias en estos campos. Anteriormente, las mujeres debían salir de los campos y recorrer largas distancias para encontrar madera para cocinar. En estas zonas, debido a la violencia presente, esto suponía un riesgo muy importante. A partir de la puesta en marcha de este proyecto, la violencia contra las mujeres que iban en busca de madera ha disminuido.



Figura 17. Cocinas de tipo panel en el campo de refugiados de Iridimi

Fuente: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Iridimi_Refugee_Camp, accedido en marzo de 2015

4.3.2. India

El templo de Tirumala Tirupati Devasthanam cuenta con el mayor sistema de cocina solar en el mundo. Este proyecto cuenta con 106 concentradores parabólicos usados en

el diseño de cocina comunitaria Scheffler. Este sistema funciona a través de unos reflectores flexibles que reflejan la radiación solar sobre una tubería donde se genera el vapor que se utilizará en la cocina. Gracias a esto se genera calor para cocinar comidas para más de 30.000 personas al día.



Figura 18. Reflectores situados en el tejado del templo

Fuente: <http://www.bbc.com/news/business-16746656>, accedido en marzo de 2015

4.3.3. Madagascar

Desde 2001, ADES (Association pour le Développement de l'Energie Solaire) ha estado fabricando y vendiendo cocinas solares en el suroeste de Madagascar. Esta zona estaba fuertemente afectada por la deforestación. La solución encontrada fueron las cocinas solares, ya que en este lugar se tienen sobre 330 días soleados al año. Estas cocinas son fabricadas empleando mano de obra autóctona y vendiéndolas a precios aceptables para la población. Además esta organización se encarga de dar charlas sobre el uso y construcción de las cocinas solares. Se estima que se han generado, tanto construidas como vendidas, en torno a 50.000 cocinas solares que han ayudado a reducir el consumo de madera en un 65%.



Figura 19. Construcción de cocinas solares (izquierda) y cocina solar en una escuela de Fiarenana (derecha)

Fuente: <http://solarcooking.wikia.com/wiki/Madagascar>, accedido en marzo de 2015

5. NORMATIVA ACTUAL

En un principio, las cocinas solares se vieron como un medio para el estudio de cómo los rayos solares se concentran en una zona y calientan, en este caso, los alimentos. Poco a poco, este medio de estudio ha pasado a ser una forma de cocinar distinta, más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Debido a la aparición de multitud de tipos y dispositivos distintos, surge la necesidad de comparar éstos y conocer sus capacidades. Por ello, aparecen las distintas normas de ensayo que proporcionan los distintos parámetros que sirven para la comparación. Además en estas normas se presentan las condiciones que se han de cumplir en los ensayos, al objeto de ofrecer cifras objetivas.

Las principales normativas de uso mundial, en ocasiones son difíciles de conseguir y aplicar. Dentro de estas normas tenemos la de la **Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE S580)**, la de la **Oficina de Normas de la India** y la del **Comité Europeo de Investigación sobre la Cocina Solar**. Estas normas poseen sus propios objetivos y difieren en el alcance y la complejidad. Además son incompatibles entre sí, ya que cada una tiene sus propias fortalezas y debilidades. Aun así, son herramientas muy útiles a la hora de realizar comparaciones entre distintos dispositivos.

Estas normas se encuentran en constante revisión, ya que en el campo de la cocina solar sigue habiendo mucho margen de mejora e innovación.

5.1. SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)

Esta norma fue desarrollada por el Dr. Paul Funk como un estándar de ensayos de cocinas solares. El objetivo de esta norma es la comparación a través de una sencilla pero significativa medida del rendimiento de las cocinas mediante la potencia desarrollada por los dispositivos. La simplicidad de esta norma se basa en la necesidad de poder llevarlos a cabo en zonas poco desarrolladas.

La metodología del ensayo se basa en la toma de datos de la temperatura del agua en el interior de la olla, como mínimo, cada 10 minutos. Las condiciones a cumplir son las siguientes:

- Se debe usar 7 kg agua por cada m^2 de área de apertura.
- La temperatura ambiente debe estar entre 20 °C y 30 °C.
- Se recomienda medir entre $450 \text{ W/m}^2 < G < 1.100 \text{ W/m}^2$. Se debe anular el ensayo si hay variaciones de más de 100 W/m^2 entre mediciones realizadas cada 10 minutos.
- Se deben descartar las mediciones si la velocidad del viento es superior a 2,5 m/s durante un tiempo mayor a 10 minutos.

- $R^2 > 0,75$ para los ajustes lineales que deben ser al menos de 30 puntos. Donde R^2 es el coeficiente de determinación, proporción de la variación en la potencia de la cocina que se puede atribuir a la regresión obtenida.

Para el cálculo de la potencia de calentamiento, P , va a ser necesario conocer la masa de agua y su capacidad calorífica. Partiendo de esto, se colocará la cocina orientada al Sol y se tomarán, cada diez minutos, las medidas de la temperatura del agua en el interior, la temperatura ambiente y la radiación. Dependiendo de la duración del ensayo, la cocina deberá ser reorientada, como mínimo, cada hora. Así se llegará hasta la temperatura de estancamiento o cercana a ella.

Una vez se disponen de todas las mediciones, se realiza un cálculo de la potencia a partir de la siguiente relación:

$$P = \left(\frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \right) \cdot C_{lp}$$

P = Potencia de la cocina [W]

T_2 = Temperatura final del intervalo [°C]

T_1 = Temperatura inicial del intervalo [°C]

$t_2 - t_1$ = duración del intervalo [s]

C_{lp} = capacidad calorífica del líquido (masa por calor específico del agua) [J/K]

Posteriormente, se realiza una normalización de la potencia en función de la radiación sobre la superficie de la cocina.

$$P_s = P \cdot \left(\frac{700}{I} \right)$$

P_s = Potencia normalizada [W]

P = Potencia de la cocina [W]

I = Radiación sobre la superficie de la cocina [W/m²]

700 = Valor normalizado de radiación [W/m²]

Con esto, se toma el valor de la sobre-temperatura en cada intervalo, diferencia entre temperatura del agua y temperatura ambiente. Se presenta un gráfico de la potencia normalizada frente a la sobre-temperatura con los valores obtenidos. En el gráfico aparecerá la ecuación de correlación y el coeficiente de determinación (R^2).

A partir de lo anterior, se determinará la potencia característica normalizada de la cocina, como aquella potencia en la que la sobre-temperatura es de 50 °C ($P_{s,50}$).

5.2. OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA

La norma india aparece ante el aumento de las cocinas solares en este país, especialmente las de tipo caja. Este tipo de cocina es fácilmente construible, con un rendimiento aceptable y llega a unas temperaturas de en torno a 100 °C. Esto las hace una alternativa viable, tanto económica como funcionalmente, a la cocina tradicional para la gran parte de la sociedad India que dispone de unos recursos limitados.

Esta norma está inicialmente dirigida a las cocinas de tipo caja, pero su metodología en el cálculo del rendimiento permite su uso en los distintos dispositivos de cocina solar. Esto a su vez, permite la comparación entre distintos tipos de cocinas solares, así como los distintos dispositivos de los que se dispone.

Esta norma presenta un marco más técnico que la ASAE S580. No se realiza el cálculo directo de la potencia, sino que a partir de parámetros obtenidos durante el funcionamiento de la cocina obtenemos dos figuras de mérito que permiten valorar la eficiencia del dispositivo.

Las figuras de mérito, F_1 y F_2 , se obtienen a partir de las siguientes relaciones:

- Figura de mérito 1 (F_1)

Para el cálculo de esta figura se necesita que se cumpla la condición de estacionariedad, esto es $C \frac{dT}{dt} \ll G \cdot A_a \cdot \eta_0$. Para que esto se cumpla, un factor importante es que C sea suficientemente pequeño. Por ello, la norma india recomienda calcular esta figura mediante un ensayo en vacío para llegar a la temperatura de estancamiento.

La temperatura de estancamiento se alcanza cuando el flujo de potencia neto en la cocina es igual a cero. Esto quiere decir que las pérdidas de la cocina se igualan a la ganancia debida a la radiación solar. Así, se alcanza una temperatura umbral conocida como temperatura de estancamiento.

El cálculo de F_1 se hace a partir de la siguiente ecuación:

$$F_1 = \frac{A}{A_a} \cdot \frac{T_{st} - T_a}{G} = \frac{\eta_0}{U_{st}}$$

A = Área exterior del recipiente [m^2]

A_a = Área de apertura de la cocina [m^2]

T_{st} = Temperatura de la placa de absorción (estancamiento) [$^{\circ}\text{C}$]

T_a = Temperatura ambiente del aire [$^{\circ}\text{C}$]

G = Radiación sobre la superficie de la cocina [W/m^2]

η_0 = Rendimiento óptico de la cocina

U_{st} = coef. global de transferencia de calor (estancamiento)

Los parámetros del primer término son conocidos mediante el ensayo de calentamiento en vacío hasta llegar a la temperatura de estancamiento. Debido a que la temperatura de estancamiento es un valor característico de la cocina, el valor de F_1 se mantendrá invariable ante condiciones de radiación semejantes.

Del segundo término se puede despejar el rendimiento óptico de la cocina, conocido F_1 y el coeficiente global de transferencia de calor en el estancamiento. También se puede obtener coeficiente si lo que se conociese fuese el rendimiento óptico y F_1 .

- Figura de mérito 2 (F_2)

La relación que define la figura de mérito 2 se obtiene a partir de la integración del balance de potencias en la cocina entre dos instantes de tiempo. En la ecuación resultante se sustituye η_0/UF' por F_1 .

Esta figura de mérito nos va a dar una aproximación al valor del rendimiento óptico de la cocina sobre la que realizamos el ensayo.

La ecuación que define F_2 es la siguiente, partiendo de un modelo 0D de calentamiento con parámetros constantes, salvo la temperatura y el tiempo:

$$F_2 = \frac{F_1 C_l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \left[\frac{1 - \frac{A}{A_a} \cdot \frac{1}{GF_1} \cdot (T_1 - T_a)}{1 - \frac{A}{A_a} \cdot \frac{1}{GF_1} \cdot (T_2 - T_a)} \right] \approx \eta_0 \cdot C_R ; C_R = \frac{C_l}{C}$$

F_1 = Primera figura de mérito

C_l = capacidad calorífica del líquido (masa por calor específico del agua) [J/K]

A_a = Área de apertura de la cocina [m²]

$t_2 - t_1$ = tiempo de exposición [seg.]

T_1 = Temperatura inicial del líquido

T_2 = Temperatura final del líquido

T_a = Temperatura ambiente del aire

G = Radiación media sobre la superficie de la cocina [W/ m²]

C = capacidad calorífica total (masa por calor específico total de olla, cobertor y líquido) [J/K]

5.3. COMITÉ EUROPEO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA COCINA SOLAR. PRUEBA ESTÁNDAR (ECSCR)

Conocidas la normativa americana y la normativa india, se expone la normativa europea.

El estándar propuesto por el Comité Europeo de Investigación sobre la Cocina Solar (ECSCR) tiene un alcance mucho más amplio que los estándares anteriores. Se tienen en cuenta factores de seguridad, de facilidad de acceso a la olla, de durabilidad estimada y otros factores. El principal problema que presenta esta norma es la subjetividad en estos factores, aunque pueden ser de gran utilidad. Además, se incluye un estudio térmico con el que se obtienen las hojas de datos de la cocina. Este estudio ha de llevarse a cabo en torno al mediodía solar. El ensayo, denominado “Prueba base”, se realiza de la siguiente manera:

Apartado 1:

- Calentar **agua** en la cocina desde una temperatura inicial de 40°C hasta su temperatura de ebullición o de estancamiento. La cocina debe haber sido orientada hacia el Sol antes del ensayo para su precalentamiento. Recipiente tapado.
- Una vez alcanzado uno de los dos estados anteriores, desorientar la cocina de la incidencia directa de los rayos solares (girándola) y dejar enfriar hasta 80°C.

Apartado 2:

- Calentar **aceite** en la cocina desde una temperatura inicial de 40°C hasta su temperatura de estancamiento. La cocina debe haber sido orientada hacia el Sol antes del ensayo para su precalentamiento. Recipiente destapado.
- Con el mismo aceite, desorientar la cocina de la incidencia directa de los rayos solares (girándola) y dejar enfriar hasta 100°C.

Apartado 3:

- Repetir el **apartado 1** sin precalentar la cocina.

Apartado 4:

- Repetir el **apartado 1** con el recipiente de agua destapado.

Apartado 5:

- Repetir el **apartado 1** colocando la cocina en un ángulo de incidencia menor respecto al de máxima radiación solar. Esta prueba caracteriza el rendimiento de la cocina en condiciones de mañana o tarde.

Aunque los apartados anteriores son los principales ensayos a tener en cuenta, también se pueden realizar otros ensayos con distintas combinaciones que nos permitan caracterizar el rendimiento de la cocina.

Para realizar estos ensayos hay que tener en cuenta que se cumplan ciertas condiciones meteorológicas. Estas condiciones son las siguientes:

- Temperatura ambiente entre 25 °C y 35 °C
- Velocidad del viento menor de 4 m/s.
- Radiación solar global (superficie horizontal) mayor de 800 W/m².

Como se puede observar, esta norma presenta un gran valor en el campo de la comparativa en el funcionamiento de las cocinas en días muy similares. Uno de los principales problemas que tiene es que no genera parámetros característicos de la cocina por lo que hay que comparar el comportamiento y no un simple valor característico.

Además presenta la desventaja de no tomar en consideración la radiación y la temperatura ambiente, esto hace que los ensayos sólo puedan ser comparados en días muy similares o en ensayos simultáneos para distintas cocinas.

5.4. DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL

El desarrollo del modelo que a continuación se expone es un estudio realizado por el **Prof. Antonio Lecuona Neumann**, de la Universidad Carlos III de Madrid. El propio autor de este trabajo ha facilitado su contenido íntegro para poder realizar todo el estudio de simulación y caracterización experimental de la cocina objeto de este proyecto.

Este modelo cero-dimensional parte de la fijación de una serie de hipótesis que permiten la estandarización de los criterios de estudio de esta norma, con la finalidad de obtener una base común para la comparación de los estudios que sigan esta norma.

- La capacidad térmica total (C), despreciando las diferencias de temperatura entre alimento-líquido (C_{fl}), olla (C_s) y cobertor (C_{co}), es la siguiente:

$$C = C_{fl} + C_s + C_{co}$$

Generalmente, los ensayos se realizan con líquido y sin alimento por lo que C_{fl} se convertiría en C_l . Además es frecuente que se cumpla que C_s y $C_{co} \ll C_{fl}$.

- La intensidad de la radiación solar presenta tres componentes: *directa*, *difusa* y *reflejada*. Para cada ensayo se debe indicar cuales de ellas se están teniendo en cuenta. Además y si no se indica lo contrario, para los cálculos del rendimiento, se va a tener en cuenta la radiación sobre el plano horizontal. En el caso de no usar la radiación sobre el plano horizontal, se usará la radiación sobre el plano de la cocina normal a los rayos solares, tal es el caso de la cocina Hot Pot. Si para unificar criterios se considerase la radiación en el plano horizontal, no se

obtendrían resultados muy distintos en verano pero sí en invierno, debido a la altura solar.

- La **eficiencia óptica** de captación de los rayos solares, η_0 , va a ser función de la transmisividad combinada de la superficie de la cocina y de la olla, y la absorptancia de esta última. Como generalmente no se dispone de los valores de la transmisividad y la absorptancia, este modelo nos permite obtener dicho valor de forma experimental.
- Se va a considerar un valor de temperatura ambiente (T_a) constante para cualquier punto de medición en un momento dado. Así, no se tendrá en cuenta la temperatura de radiación en las cercanías de la olla. Esto no significa que las pérdidas por radiación no se tengan en cuenta, sino que el ambiente va a tomar una temperatura constante en todos sus puntos a modo de simplificación. Frente a intervalos de temperatura en un tiempo fijo, se tomará como temperatura ambiente la temperatura media entre los valores inicial y final del intervalo sujeto a estudio.
- Se deben fijar los valores del **área de apertura** (A_a) por donde entran los rayos solares y del **área de colección** (A), sobre la cual se absorbe la radiación solar. En función de la cocina que se está estudiando, esta determinación puede resultar más o menos compleja, y va a diferir de un dispositivo a otro. Con el fin de seguir unificando criterios para permitir realizar un estudio comparativo entre los distintos dispositivos de cocción lo más fiable posible, se tendrá en cuenta un área de colección constante e igual para todos ellos. Esta área de colección se aconseja que sea la totalidad del área exterior del recipiente.
- Unido al valor del área de colección (A) se especifica también el **coeficiente global de transferencia de calor** (U). Una vez fijado el valor del área, el valor de U irá siempre invariable en función del primero, así se puede decir que las variables “ AU ” son, a modo de cálculo, inseparables. Junto con ambos valores, es necesario acompañar un factor que se denomina como el coeficiente F' , el cual hace referencia a la relación de convección entre el alimento y las paredes interiores del recipiente que lo contiene.

Conocidas las hipótesis, se pasa al cálculo de los distintos parámetros intermedios que nos permiten calcular la eficiencia óptica, objetivo principal de esta norma.

Para el cálculo se hará uso de [Incropera] y [Duffie & Beckman], y mediante las expresiones de la potencia de calentamiento y la curva de enfriamiento obtendremos los parámetros intermedios y la eficiencia óptica que caracterizan el dispositivo.

Con la curva de enfriamiento, se va a estudiar la capacidad de nuestra cocina para retener el calor cuando se encuentra totalmente a la sombra.

Para ello lo primero que se va a tener en cuenta son las variables que rodean a nuestra cocina. Sabiendo que el ensayo se realiza a la sombra, la radiación incidente será nula ($G = 0$). Además, se supondrá que la temperatura ambiente es constante al igual que los valores de AUF' en cada intervalo. Si entramos en la expresión de la potencia de calentamiento:

$$C \frac{dT}{dt} = A \cdot \underbrace{G}_0 \cdot \eta_0 - AUF' \cdot (T - T_a)$$

Considerando:

$$t_0 = \frac{C}{AUF'}$$

Si integramos la ecuación inicial partiendo de una temperatura T_0 en $t=0$ hasta una temperatura T_1 en t , obtendremos la relación entre los intervalos de bajada de temperatura, y el tiempo de enfriamiento característico sin sol, t_0 :

$$\frac{T_1 - T_a}{T_0 - T_a} = e^{(-\frac{t}{t_0})}$$

Una vez conocida esta relación, se puede obtener el valor de t_0 para cada intervalo, así como el valor de AUF' . Este último parámetro será constante en cada intervalo y dependerá del tiempo de enfriamiento y de la masa y el calor específico de los materiales de cocción.

Para la obtención de t_0 , a partir de datos experimentales, se puede hacer uso de dos relaciones según su orden.

$$\text{Primer orden: } t_{0,i+1/2} = \frac{t_{i+1}-t_i}{\ln \frac{T_i-T_a}{T_{i+1}-T_a}} ; \text{ Segundo orden: } t_{0,i} = \frac{t_{i+1}-t_{i-1}}{\ln \frac{T_{i-1}-T_a}{T_{i+1}-T_a}}$$

Tras obtener el tiempo de enfriamiento característico medio, de los obtenidos en todos los intervalos, se pasa al cálculo de la eficiencia óptica, objetivo principal de la norma.

Ahora se hará uso de la curva de calentamiento, por lo que también se tendrá en consideración la radiación constante sobre nuestra cocina. Por tanto, tras la obtención de las temperaturas de la curva de calentamiento y mediante la integración de la expresión de la potencia de calentamiento entre dos instantes de tiempo, se obtendrá la siguiente relación:

$$(t_2 - t_1) = -t_0 \cdot \ln \left[\frac{1 - \frac{A}{A_a} \frac{UF'}{G\eta_0} (T_1 - T_a)}{1 - \frac{A}{A_a} \frac{UF'}{G\eta_0} (T_2 - T_a)} \right]$$

Despejando la eficiencia óptica (η_0):

$$\eta_0 = \frac{C}{A_a \cdot G \cdot t_0} \left[\frac{(T_2 - T_a) - (T_1 - T_a) \cdot \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_0}\right)} \right]$$

Resumiendo, con esta norma necesitaremos tanto ensayo de calentamiento como de enfriamiento. Con los datos del ensayo de enfriamiento se calculará t_0 y AUF' . A partir de los parámetros anteriores y con los datos del ensayo de calentamiento se calculará la eficiencia óptica con la ayuda de la relación anterior.

6. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA COCINA

La cocina Hot Pot es una cocina de tipo panel. Consta de un reflector de aluminio, una olla de acero esmaltado negro sin tapa y una olla completa de vidrio templado que actúa como cobertor en la parte inferior.



Figura 20. Partes de la cocina Hot Pot. Olla de acero (izquierda), olla de vidrio (centro) y reflector (derecha).

Fuente propia

Una de las principales ventajas que posee esta cocina es su reflector fácilmente plegable. Este reflector está formado por láminas de aluminio reflectantes unidas por bisagras de tipo piano. La capacidad de plegado permite disminuir considerablemente el tamaño del reflector para su almacenaje. En la siguiente figura puede observarse el proceso de plegado y desplegado del reflector.

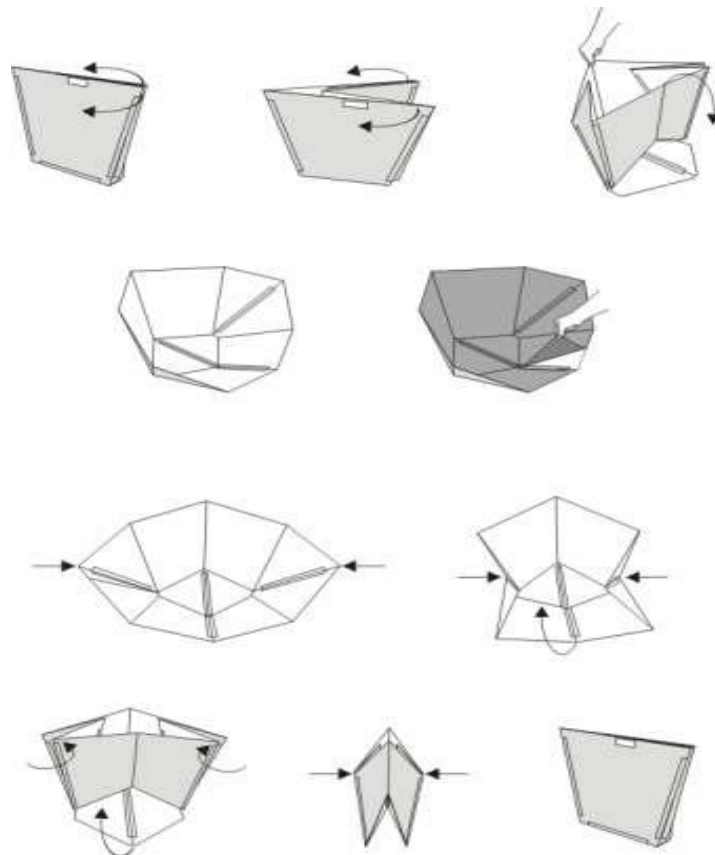


Figura 21. Proceso de plegado y desplegado del reflector de la cocina Hot Pot.

Fuente: Guía de uso de la cocina Hot Pot

El principio de funcionamiento es el mismo que las demás cocinas de tipo panel. La radiación solar llega al reflector y se refleja sobre la superficie negra de la olla de metal. En este caso no es necesario el uso de un cobertor ya que la olla de vidrio actúa como tal, debido a la cámara de aire existente en la parte inferior al colocar la olla de metal dentro de la olla de vidrio. Por ello, a esta olla de vidrio se le llama cobertor en el estudio realizado.



Figura 22. Olla de metal dentro del cobertor de vidrio.

Fuente propia

Este sistema presenta cierta desventaja, ya que no toda la olla se ve afectada por el efecto del cobertor. En la parte superior no hay cámara de aire y por tanto no se produce el efecto invernadero, lo que aumenta las pérdidas por esa zona.

7. ANÁLISIS DE LAS ÁREAS DE LA COCINA

7.1. ANÁLISIS DEL ÁREA DE RECEPCIÓN DE LA OLLA (A)

Para el cálculo del área de recepción, se divide el área total de la olla metálica en tres: área lateral, área superior y área inferior. La primera se considera como una zona esférica y las dos últimas se consideran dos círculos.

Para los cálculos se usan los valores medidos:

$$D=0,255 \text{ m}; d=0,1 \text{ m}; h=0,1 \text{ m}$$

Siendo,

D el diámetro superior

d el diámetro inferior

h la altura de la olla



Figura 23. Vista superior (izquierda) y lateral (derecha) de la olla metálica.

Fuente propia

- Área lateral:

$$A_{lat} = \pi Dh = 0,080 \text{ m}^2$$

- Área superior:

$$A_{sup} = \pi \frac{D^2}{4} = 0,05 \text{ m}^2$$

- Área inferior:

$$A_{inf} = \pi \frac{d^2}{4} = 0,007 \text{ m}^2$$

- Área de colección:

$$A = A_{lat} + A_{sup} + A_{inf} = 0,139 \text{ m}^2$$

7.2. ANÁLISIS DEL ÁREA DE APERTURA (A_a)

En este apartado se lleva a cabo un análisis del área de apertura. El área de apertura de la cocina es la superficie de la cocina expuesta a la radiación solar. Se considera siempre perpendicular a los rayos solares. La variación del área de apertura es tremendamente importante, ya que indica la cantidad de radiación que es capaz de recibir la cocina.

La metodología seguida para obtener el área de apertura ha sido la realización de fotografías y el cálculo del área de apertura a partir de éstas con el programa AutoCAD. Con la ayuda de un trípode, se ha regulado la inclinación de la cámara para poder simular la altura solar.



Figura 24. Detalle de regulación de la inclinación de la cámara en el trípode.

Fuente propia

A continuación se detallan los análisis realizados y su motivación.

7.2.1. Área de apertura en función de la altura solar

La motivación de este análisis surge del hecho de la variación de la altura solar a lo largo del día y los distintos meses, así como las distintas latitudes. Así, este análisis pretende dar información acerca del comportamiento del área de apertura en función de esos parámetros.

Para este estudio se realizaron dos fotografías para cada graduación de la altura solar, de ahí que en las tablas aparezcan dos medidas de las mismas. El cálculo del área de apertura se realizó con AutoCAD. En la fotografías, aparece una medida conocida que sirve de base para re-escalar las mismas y así poder calcular el área de apertura. En este caso se hizo uso de una cinta métrica con una medida de 50 cm. A continuación se presenta algunas fotografías de distintas alturas solares sin re-escalar.

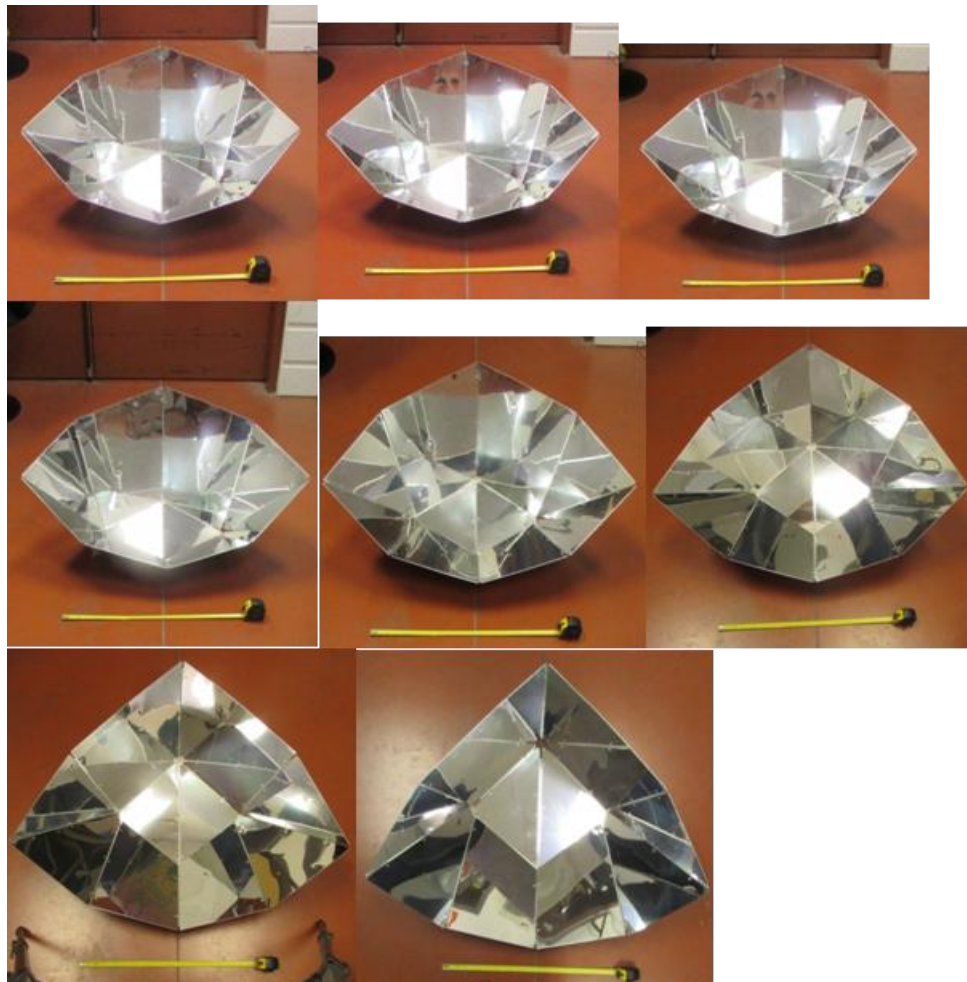


Figura 25. Fotografías usadas para el cálculo del área de apertura de la cocina para distinta altura solar. De izquierda a derecha y de arriba abajo: 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 90°.

Fuente propia

Las mediciones realizadas generaron los siguientes resultados:

ALTURA SOLAR [°]	ÁREA APERTURA 1ª medida [m ²]	ÁREA APERTURA 2ª medida [m ²]	ÁREA APERTURA media [m ²]
10	0,178	0,203	0,190
20	0,184	0,215	0,199
30	0,197	0,229	0,213
40	0,219	0,247	0,233
50	0,256	0,292	0,274
60	0,321	0,361	0,341
70	0,440	0,432	0,436
90	0,461	0,470	0,465

Nota: La medición con un ángulo de 80° resultó físicamente imposible, por lo que no aparece en los datos anteriores.

En el siguiente gráfico se puede ver la variación del área de apertura respecto a la altura solar. Se representa con puntos los datos obtenidos en las mediciones y con una línea continua, las medias de las medidas.

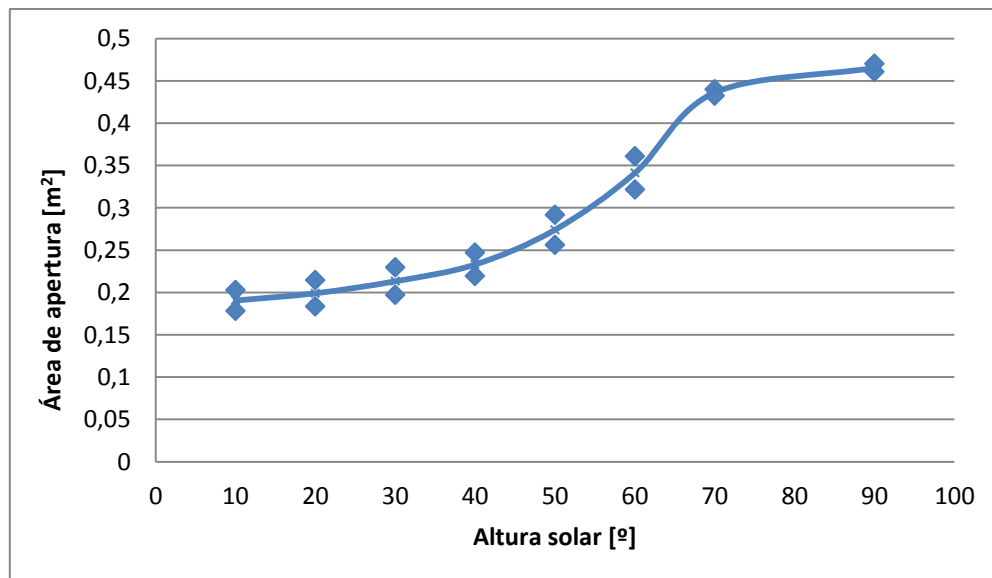


Gráfico 1. Área de apertura frente a altura solar

Un análisis de estos resultados permite comprobar que el reflector está optimizado para grandes elevaciones del Sol sobre el horizonte, solo posibles en bajas latitudes, horas centrales del día y verano. En Madrid tenemos al mediodía solar del solsticio de verano

$90^\circ - 40^\circ + 23.5^\circ = 73.5^\circ$. En el de invierno $90^\circ - 40^\circ - 23.5^\circ = 26.5^\circ$, ambos ángulos extremos. Por ello, parece optimizada para latitudes más bajas que la nuestra, aunque en el solsticio de verano, el área de apertura es cercana a la máxima.

Este gráfico pretende ser un método sencillo para conocer el área de apertura de la cocina conociendo previamente la altura solar.

7.2.2. Área de apertura en función de la desorientación azimutal para distintas alturas solares

La motivación de este análisis surge del hecho del movimiento azimutal del Sol. El Sol recorre 15° cada hora a lo largo de su trayectoria. Si la cocina no se va reorientando cada instante, siempre habrá una desorientación azimutal. Por ello, el ángulo estudiado es el que forma la proyección de la normal al área de apertura con la proyección del Sol sobre el plano horizontal. El estudio se realiza para ángulos de 7.5° , lo que equivale a media hora aproximadamente. El objetivo es conocer las pérdidas en el área de apertura que ocasiona la desorientación de la cocina respecto al Sol.

Además, se realiza este estudio para distintas alturas solares para que sea extrapolable a distintas latitudes, distintos días del año y distintas horas del día. Las alturas solares comienzan en 10° y van aumentando de 10° en 10° , a excepción de las alturas solares de 90° , no hay variación del área de apertura, y 80° , por imposibilidad técnica.

La metodología de cálculo es similar a la del caso anterior. Se realizan fotografías con ayuda de un trípode que permite simular la altura solar. Además, el reflector se gira desde 0° a 30° en ángulos de 7.5° con respecto a la dirección de realización de las fotografías. Con posterioridad, se realiza el cálculo del área de apertura con la ayuda de AutoCAD. A continuación se adjuntan algunas fotografías.

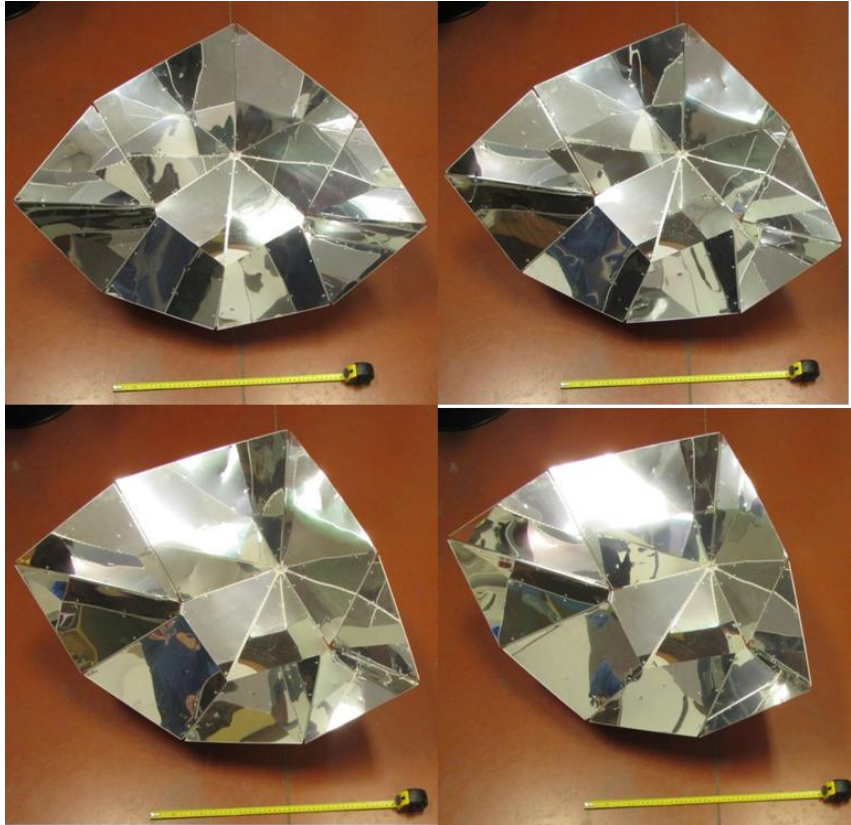


Figura 26. Fotografías usadas para el cálculo del área de apertura en función de la altura solar y la desorientación azimuthal. De izquierda a derecha y de arriba abajo, altura solar 60° y desorientación azimuthal de $7,5^\circ$; 15° ; $22,5^\circ$; 30° .

Fuente propia

A continuación se presentan el área de apertura y el porcentaje de aumento de la misma para distintas desorientaciones azimuthales. Nótese que un aumento negativo del área de apertura, es una pérdida.

7.2.2.1. Altura solar 10°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,186	-8,28
-22,5	0,195	-3,99
-15	0,198	-2,22
-7,5	0,21	3,55
0	0,203	0
7,5	0,21	3,55
15	0,198	-2,22
22,5	0,195	-3,99
30	0,186	-8,28

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

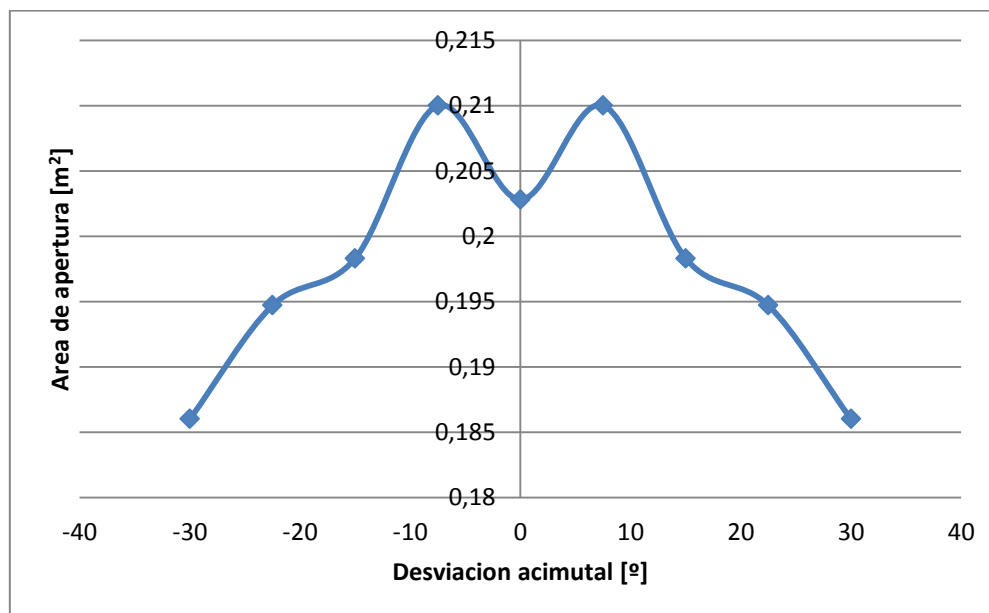


Gráfico 2. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 10°.

7.2.2.2. Altura solar 20°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,193	-10,21
-22,5	0,202	-6,01
-15	0,213	-0,89
-7,5	0,214	0,33
0	0,215	0
7,5	0,214	0,33
15	0,213	-0,89
22,5	0,202	-6,01
30	0,193	-10,21

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

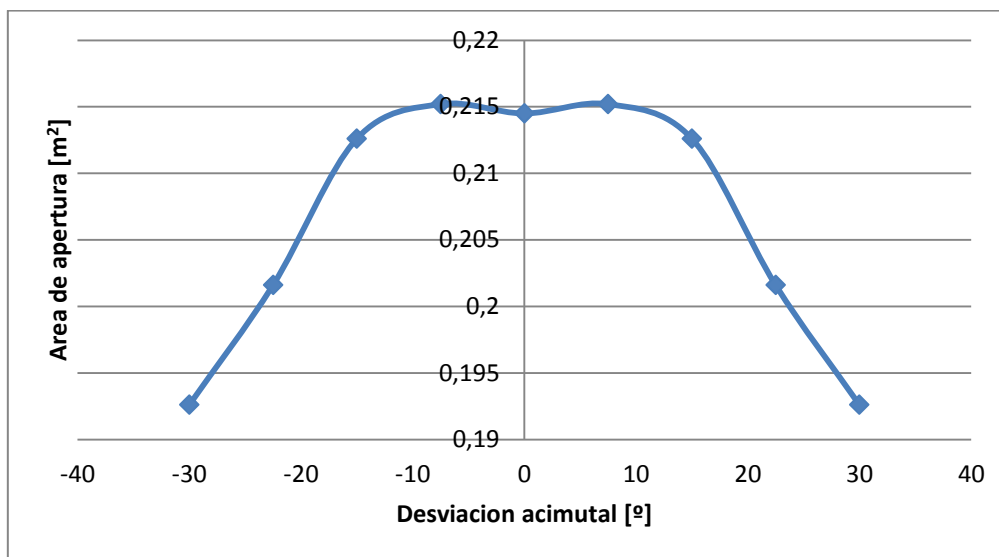


Gráfico 3. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 20°.

7.2.2.3. Altura solar 30°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,202	-11,94
-22,5	0,209	-8,94
-15	0,220	-4,14
-7,5	0,224	-2,22
0	0,229	0
7,5	0,224	-2,22
15	0,220	-4,14
22,5	0,209	-8,94
30	0,202	-11,94

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

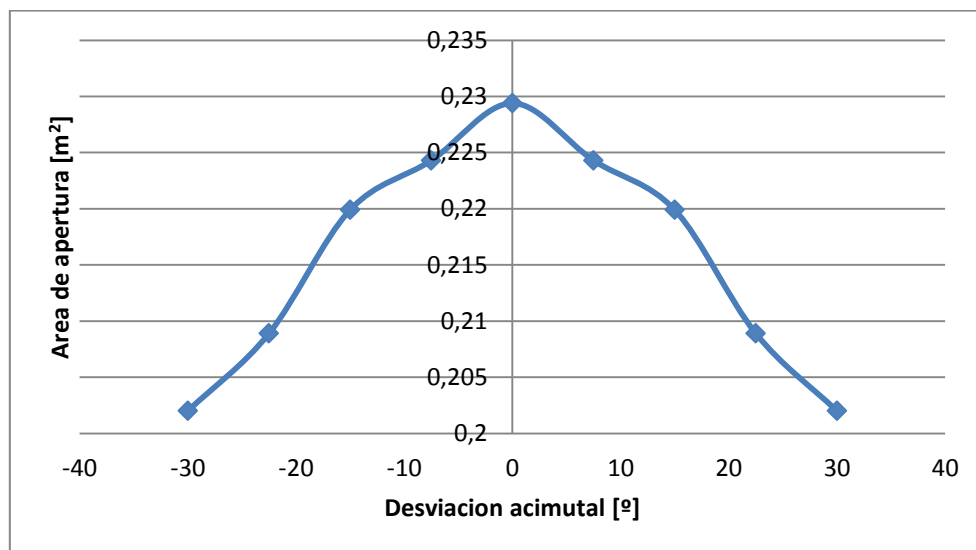


Gráfico 4. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 30°.

7.2.2.4. Altura solar 40°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,219	-11,14
-22,5	0,230	-6,73
-15	0,241	-2,55
-7,5	0,248	0,45
0	0,247	0
7,5	0,248	0,45
15	0,241	-2,55
22,5	0,230	-6,73
30	0,219	-11,14

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

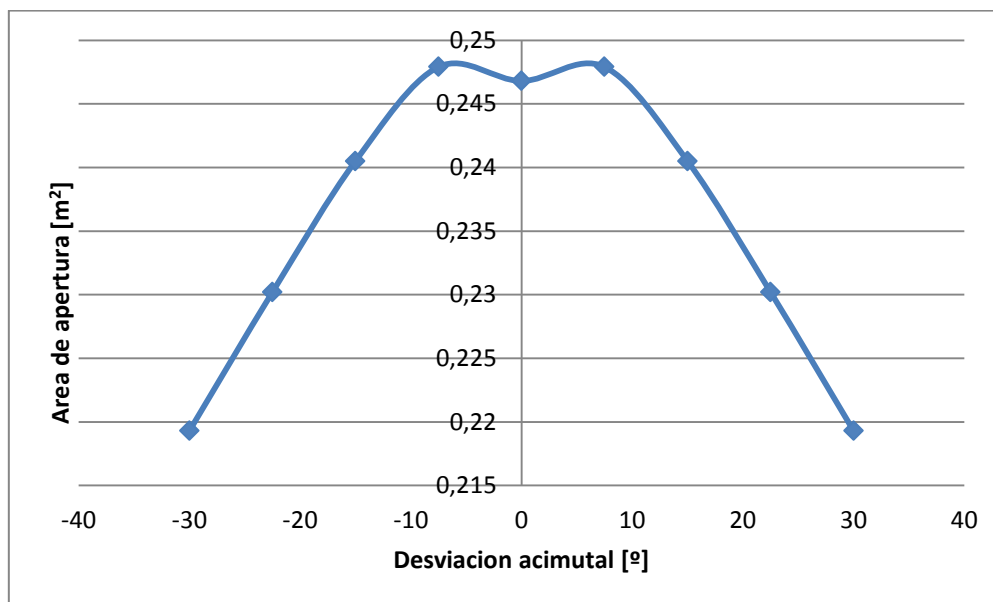


Gráfico 5. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 40°.

7.2.2.5. Altura solar 50°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,265	-9,32
-22,5	0,275	-5,86
-15	0,289	-0,96
-7,5	0,293	0,51
0	0,292	0
7,5	0,293	0,51
15	0,289	-0,96
22,5	0,275	-5,86
30	0,265	-9,32

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

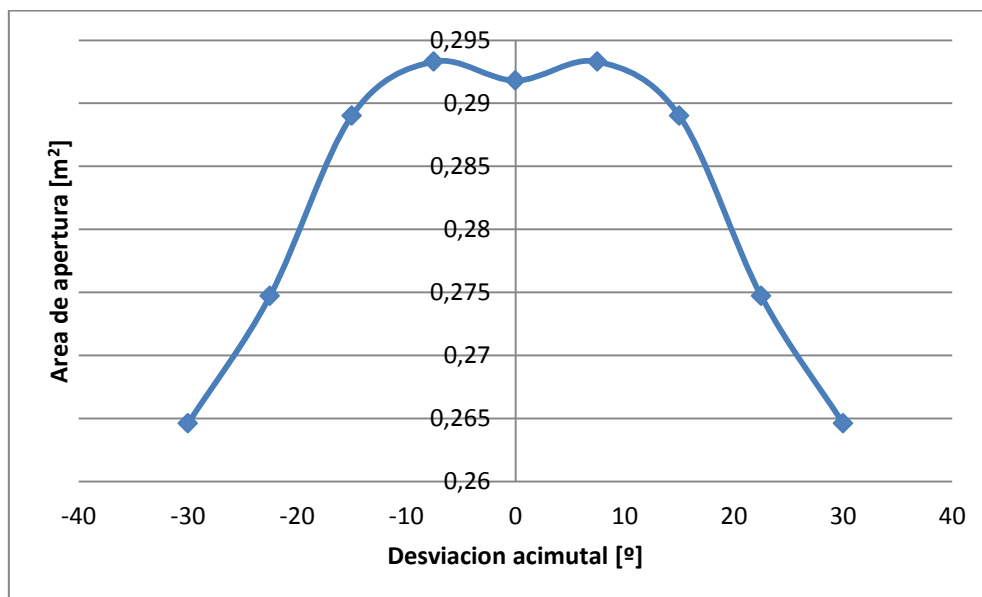


Gráfico 6. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 50°.

7.2.2.6. Altura solar 60°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,335	-7,04
-22,5	0,348	-3,63
-15	0,357	-0,97
-7,5	0,363	0,61
0	0,361	0
7,5	0,363	0,61
15	0,357	-0,97
22,5	0,348	-3,63
30	0,335	-7,04

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

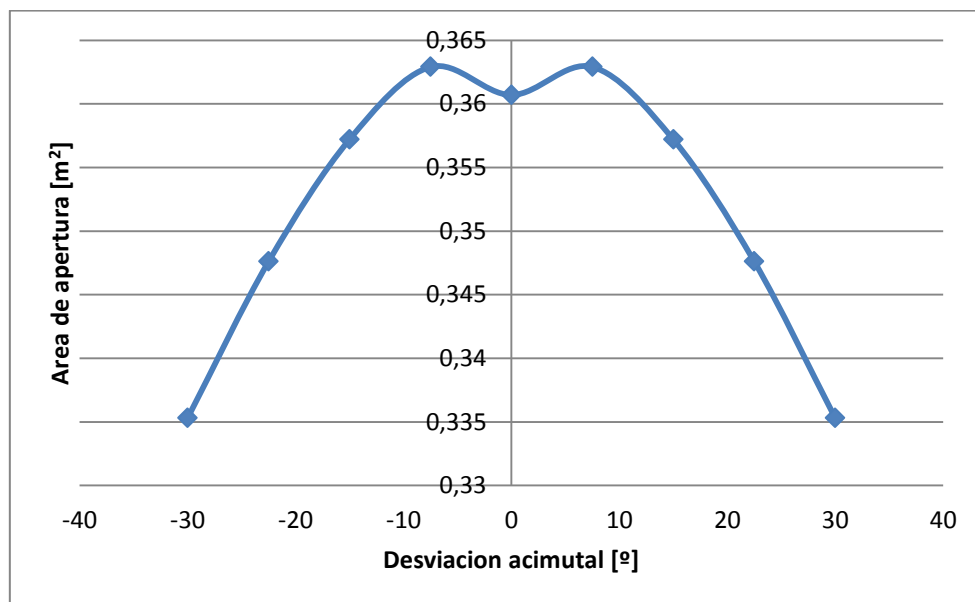


Gráfico 7. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 60°.

7.2.2.7. Altura solar 70°

Desviación acimutal [°]	Área de apertura [m ²]	% Aumento del área
-30	0,402	-6,94
-22,5	0,411	-4,90
-15	0,422	-2,47
-7,5	0,431	-0,30
0	0,432	0
7,5	0,431	-0,30
15	0,422	-2,47
22,5	0,411	-4,90
30	0,402	-6,94

En el siguiente gráfico se representa el área de apertura respecto a la desorientación acimutal.

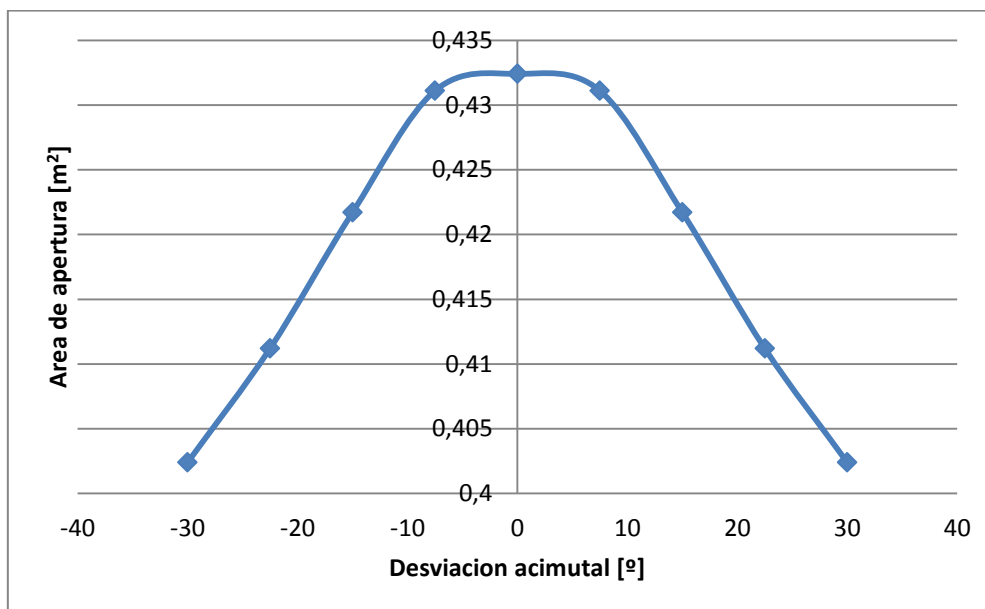


Gráfico 8. Área de apertura frente a desviación acimutal para una altura solar de 70°.

Como se puede observar en los datos anteriores, el área de apertura no presenta una variación muy significativa en los primeros 15°, primera hora de desorientación, lo cual resulta satisfactorio, al objeto de no tener que reorientar a menudo. El dato más desfavorable que se obtiene es una pérdida de un 4,1% en el área de apertura para una altura solar de 30°. Esto implica que la orientación de la cocina debería realizarse cada hora como mínimo para evitar pérdidas apreciables.

Además se observa que para desorientaciones de 7,5°, una media hora, el área de apertura aumenta a excepción de las alturas solares de 30° y 70°. Esto implica que una desorientación de media hora, puede ser favorable en la mayoría de las ocasiones aunque no de una manera muy significativa. La mayor ganancia en área de apertura es de un 3,55% que se obtiene a una altura solar de 10°, mientras para el resto la ganancia no llega al 1%.

Con las apreciaciones anteriores, se puede afirmar que en esta cocina la reorientación óptima, debería realizarse cada 30 minutos a una hora. Con ello evitaremos en la medida de lo posible las pérdidas en el área de apertura. Aunque siempre se podría ajustar más los tiempos de reorientación para una altura solar en concreto observando los resultados suministrados.

Como resumen, se presenta el siguiente gráfico en el que se observa la variación del área de apertura en función de la altura solar para distintas desorientaciones azimutales. Con él se puede conocer el área de apertura de nuestra cocina para cualquier desorientación, menor a dos horas, y cualquier altura solar.

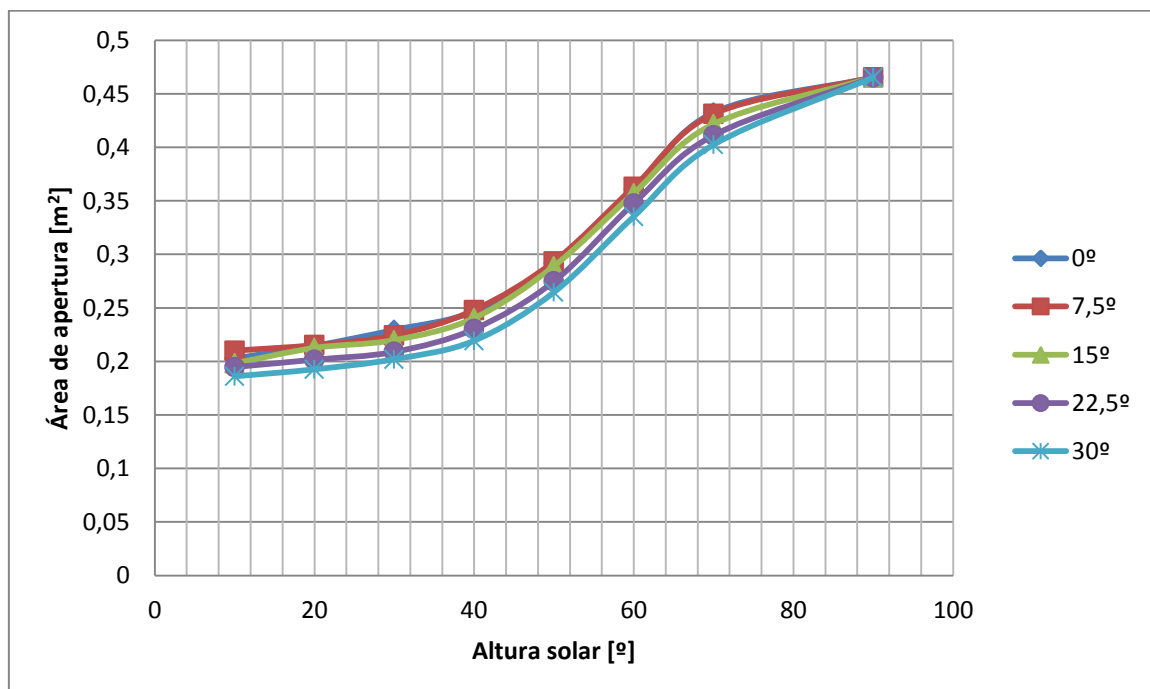


Gráfico 9. Área de apertura frente a altura solar para distintas desviaciones acimutales.

7.2.3. Particularización del área de apertura en los días de los ensayos

En este apartado se da un valor del área de apertura referido a los días en los que se han realizado los ensayos. Este valor se usa, posteriormente, en el cálculo de los distintos parámetros que definen la caracterización.

La metodología a seguir para el cálculo del área de apertura es la estimación de la altura solar media en los días en los que se realizan las mediciones y, con los gráficos obtenidos anteriormente, obtener un valor para el área de apertura.

7.2.3.1. Cálculo de la altura solar media

El cálculo se realiza para el día intermedio de los tres días en los que se han hecho las mediciones, esto es, para el día 30 de octubre.

El cálculo de la altura solar conlleva primeramente, el cálculo de la declinación en esta fecha. Posteriormente se hallan los ángulos horarios en los que se realizan las medidas, esto es, el mediodía solar ± 2 horas. Conocida la latitud de medida, se aplican todos los datos obtenidos para hallar la altura solar.

- Declinación (δ):

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(360^\circ \cdot \frac{284 + d}{365}\right)$$

Donde d , para el 30 de octubre es $d=303$.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(360^\circ \cdot \frac{284 + 303}{365}\right)$$

$$\delta = -14,74^\circ$$

- Ángulo horario (ω):

$$\omega = 360 \cdot \frac{\text{hora solar} - 12h}{24h}$$

Como se ha dicho anteriormente, se considera la hora solar desde las 10 horas hasta las 14 horas. Así, se obtiene:

Hora solar [h]	Ángulo horario ω [°]
10	-30
11	-15
12	0
13	15
14	30

- Latitud (ϕ):

Los ensayos han sido llevados a cabo en el Campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid, España. La latitud de esta localización es 40,334 N (Fuente: *Google Maps*). Por lo tanto, $\phi=40,334^\circ$.

- Altura solar (γ_s):

$$\gamma_s = 90^\circ - \arccos(\cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \phi)$$

Introduciendo los valores anteriores, se obtienen las siguientes alturas solares:

Altura solar [°]
28,28
33,19
34,93
33,19
28,28

Obteniendo el valor medio de las alturas solares, tenemos $\gamma_s=31,57^\circ$. Se aproxima a un valor de altura solar de 30° .

A partir de los resultados anteriores y usando el gráfico o la tabla correspondiente (área apertura vs altura solar) se obtiene un área de apertura (A_a) de $0,213 \text{ m}^2$. Viene a ser del orden de la mitad de la máxima conseguible, luego, la captación de Sol no resulta óptima en esta fecha del año en Madrid.

8. DATOS EXTRAIDOS DE LOS ENSAYOS DE OTOÑO

En este apartado se incluyen los datos obtenidos en las mediciones realizadas. La localización de todas las mediciones es el campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid (Latitud: 40.334 N Longitud: -3.765 E) (*Fuente: Google Maps*).

En cada uno de los días, se ha realizado un ensayo de calentamiento y otro de enfriamiento, según marca la teoría de un modelo 0D que permite caracterizar completamente las prestaciones de la cocina. Además para cada día se indica si el ensayo se ha realizado con carga (AGUA) o en vacío (VACÍO). Esto permitirá hallar los distintos parámetros según las distintas normas.

Para obtener los máximos valores de radiación solar, los ensayos se han realizado en las horas centrales del día, a ± 2 horas del mediodía solar (13:00 hora local). Además de los valores máximos de radiación, se obtiene una variación pequeña y lenta de la radiación, que favorece el cálculo de los parámetros. Esto puede verse afectado por la presencia de nubes.

Las tablas muestran la radiación solar y la temperatura ambiente, parámetros necesarios para la caracterización de la cocina. Además se mostrarán gráficos de calentamiento y enfriamiento con la temperatura media, de entre las dos medidas por los termopares, en el interior de la olla.

La velocidad del viento es importante a la hora de obtener los resultados de ensayo de nuestra cocina solar. Al existir un cierto viento aumenta el coeficiente de transferencia de calor con el ambiente (U), puesto que la incidencia del viento sobre las paredes de la olla va a provocar un aumento de la radiación y de la transferencia de calor al ambiente. A pesar de esto no se han realizado medidas por no disponer de los aparatos necesarios. No obstante, los días en los que se han realizado los ensayos, el aire permaneció en calma durante la totalidad de los ensayos, excepto por muy pequeñas rachas de viento suave con duraciones menores de 1 minuto.

El intervalo de tiempo entre el que se han tomado medidas ha sido de 10 minutos para los ensayos con carga y de 5 minutos para el ensayo en vacío. La diferencia en el intervalo considerado se debe a la mayor rapidez en la variación de las temperaturas en el ensayo en vacío respecto al ensayo con carga. Todo esto parte de la base de que para un intervalo de 10 minutos, o menor, las variaciones atmosféricas no pueden ser muy significativas respecto al instante de tiempo inmediatamente anterior siempre y cuando nos encontremos en condiciones normales. Estas condiciones se verán seriamente afectadas por otros elementos tales como nubes.

Los aparatos utilizados para realizar las mediciones se pueden observar en el Anexo 3.

8.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DÍAS DE ENSAYO

Los ensayos fueron llevados a cabo los días 29, 30 y 31 de octubre de 2014. Las condiciones climatológicas en los tres días fueron muy similares. Por ello se realiza una descripción general de dichas condiciones para los tres días y a continuación se presentan las pequeñas diferencias entre estos días.

En estos días, el cielo se veía prácticamente azul debido a que la presencia de nubes era escasa tirando a nula. No obstante, el día 29 de octubre aparecieron pequeños cúmulos nubosos que ocultaron el Sol durante cortos períodos de tiempo, los cuales se verán reflejados en las medidas de la radiación presentadas a continuación. Estas condiciones permitieron medir unos niveles de radiación relativamente altos para la época del año en la que nos encontrábamos.

El viento en los días de ensayos fue bastante reducido. Mientras los días 29 y 30 apenas hubo viento, el día 31 se pudo apreciar un viento mayor. Aun así, este viento se presentaba en rachas cortas de menos de 1 minuto de duración y espaciadas en torno a 15 minutos o más aunque de manera heterogénea.

En cuanto a la temperatura ambiente tal y como se verá en los datos recopilados a continuación fueron días cálidos para las fechas en las que nos encontrábamos. La temperatura media de los tres días rondó los 21 °C

8.2. HOJAS DE DATOS

A continuación se describe el formato de las tablas de datos y los distintos parámetros que aparecen.

Los intervalos de tiempo se han explicado anteriormente por lo que se da por aclarado.

Las tablas y unidades de medida usadas, según el ensayo, son las siguientes:

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación	T1	T2	Tamb1	Tamb2
[Hora:minuto]	[Hora:minuto]	[W/m ²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1	T2	Tamb1	Tamb2
[Hora:minuto]	[Hora:minuto]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]

La radiación medida es la radiación global instantánea en un plano normal a los rayos solares. Esta radiación es de la que hace uso nuestra cocina, por lo que no habrá que cambiarla de plano. En los ensayos de enfriamiento, este parámetro no es necesario y por ello no aparece en las tablas.

La temperatura de la cocina medida en el interior con distintos termopares, corresponde a T1 y T2.

La temperatura ambiente medida, a la sombra a ambos lados de la cocina, corresponde a Tamb1 y Tamb2.

Se presentarán los gráficos de calentamiento y enfriamiento haciendo uso de la media de las temperaturas del interior de la cocina, T1 y T2.

La cantidad de agua usada en los ensayos se define en el Apartado 9.1.

A continuación se presenta los datos en las tablas de los ensayos realizados.

8.2.1. Tabla día 29 de octubre de 2014 (AGUA)

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación [W/m ²]	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
11:50	10:51	975	22,2	22,4	22	23,6
12:00	11:01	973	28,1	27,5	20,2	20,9
12:10	11:11	988	34,9	34,8	20,9	20,3
12:20	11:21	988	40,5	40,3	22,6	22,3
12:30	11:31	991	46,9	46,7	22,7	22,3
12:40	11:41	993	53	52,9	22,7	20,2
12:50	11:51	871	57,8	57,6	20,4	21,4
13:00	12:01	985	61,6	61,5	21,3	21,1
13:10	12:11	981	64,6	64,5	22,3	21,8
13:20	12:21	950	67,4	67,4	22,3	21,1
13:30	12:31	923	70	69,9	23,2	22,2
13:40	12:41	946	71,9	71,9	21,9	22,4
13:50	12:51	938	73,3	73,2	23,8	21,8
14:00	13:01	919	74,8	74,8	21,3	21,5
14:10	13:11	909	75,7	75,7	24,4	23,3
14:20	13:21	800	76,8	76,8	21,8	21,8

Nota: Se observa una variación de más de 100 W/m² entre algunas medidas consecutivas debido a la aparición de nubes durante unos instantes. A pesar de que la

norma indica que estas medidas no son válidas, serán consideradas. En los cálculos se usará la radiación media del intervalo y no habrá diferencias de más de 100 W/m^2 entre dos instantes consecutivos.

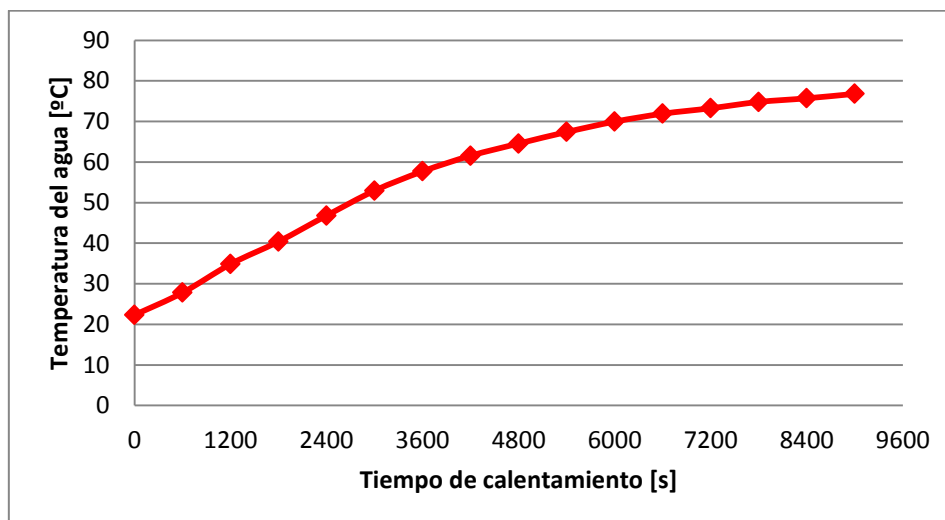


Gráfico 10. Perfil de calentamiento 29/10/2014 (AGUA).

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
14:20	13:21	76,8	76,8	21,8	21,8
14:30	13:31	72,6	72,6	21,7	22,4
14:40	13:41	67,7	67,6	22,7	22,8
14:50	13:51	62,8	62,8	22,5	22,7
15:00	14:01	59,9	59,8	22,8	22,5
15:10	14:11	56,4	56,4	22,6	22,6
15:20	14:21	53,4	53,4	22,7	22,5
15:30	14:31	50,5	50,5	22,4	22,1
15:40	14:41	48,6	48,6	22,5	22,3
15:50	14:51	46,4	46,4	22,4	22,2
16:00	15:01	44,5	44,5	22,4	22,3

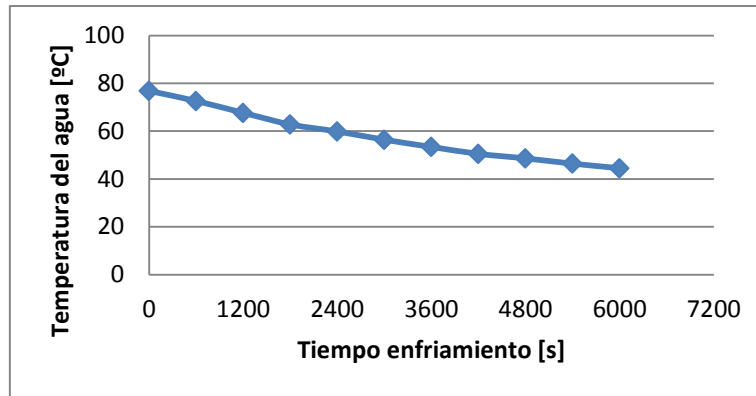


Gráfico 11. Perfil de enfriamiento 29/10/2014 (AGUA).

8.2.2. Tabla día 30 de octubre de 2014 (VACÍO)

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación [W/m ²]	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
11:00	10:01	945	44,2	44,6	20,2	18,4
11:05	10:06	939	55,9	55,6	18,5	20,8
11:10	10:11	950	63,6	64,2	18,5	20,1
11:15	10:16	958	71	71	18,7	21
11:20	10:21	961	75,3	75,9	18,9	21,2
11:25	10:26	967	81,4	81,3	21,2	21,1
11:30	10:31	970	84,2	84,5	19,7	21,2
11:35	10:36	983	87,1	87,5	21,2	20,1
11:40	10:41	991	88	88,4	19,2	19,3
11:45	10:46	998	90	89,5	20,2	22,3
11:50	10:51	998	92	91,6	22,8	20,8
11:55	10:56	993	92,7	92,4	22,7	20,6
12:00	11:01	996	92,9	92,7	20,6	22,3
12:05	11:06	1.007	93,5	93,9	22,8	21,7
12:10	11:11	1.010	95,1	94,7	21,7	21,4
12:15	11:16	1.017	95,6	95,8	23,7	21,6
12:20	11:21	1.020	96	97,3	20,6	21,6
12:25	11:26	1.021	98,4	97,4	24,2	22,4
12:30	11:31	1.022	97,9	97,3	23	22,3
12:35	11:36	1.020	98,6	98,2	24,6	23,3
12:40	11:41	1.018	98,4	98,4	23,6	24
12:45	11:46	1.018	97,6	97,4	23,7	22,4

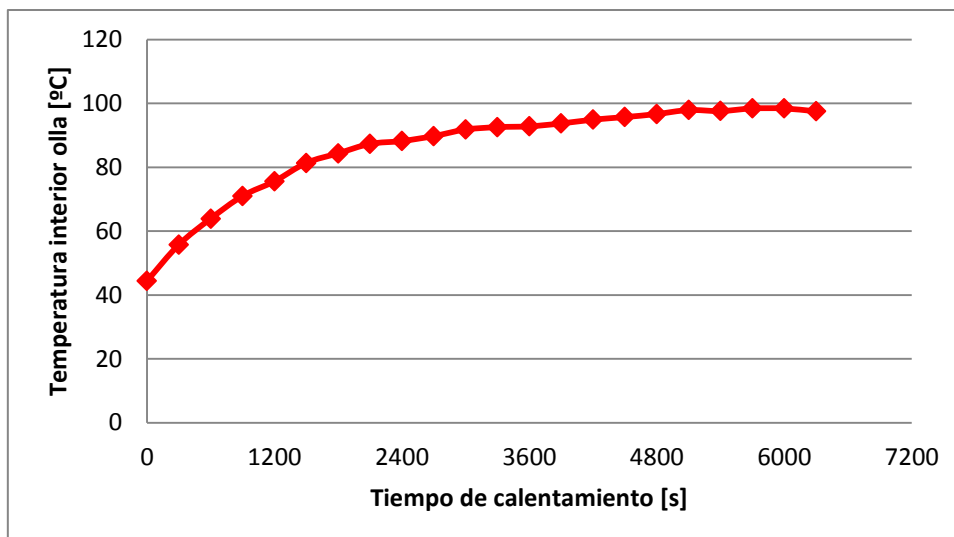


Gráfico 12. Perfil de calentamiento 30/10/2014 (VACÍO).

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
12:50	11:51	87,8	87,4	21,5	22,6
12:55	11:56	68,5	68	20,8	20,8
13:00	12:01	58,2	58,1	21,1	21
13:05	12:06	52,6	52,5	21,3	21,1
13:10	12:11	47,6	47,6	21,4	21,2
13:15	12:16	43,2	43,2	21,3	21,1
13:20	12:21	40,2	40,3	21,3	21,2
13:25	12:26	37,8	37,6	21,3	21,2
13:30	12:31	35,8	35,9	21,6	21,7
13:35	12:36	34,7	34,5	21,5	21,4
13:40	12:41	33,5	33,4	22,2	22,2
13:45	12:46	32,6	32,7	21,6	21,5
13:50	12:51	32	32,1	21,7	21,5
13:55	12:56	31,3	31,2	22,2	22
14:00	13:01	30,8	30,7	22,1	22,1

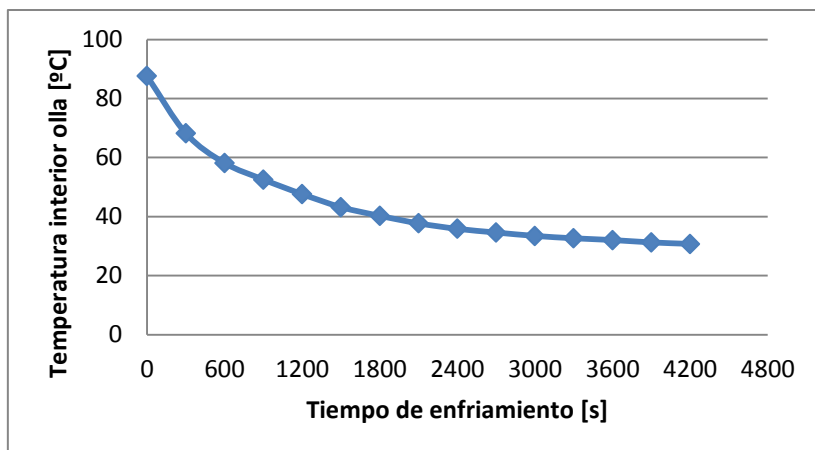


Gráfico 13. Perfil de enfriamiento 30/10/2014 (VACÍO).

8.2.3. Tabla día 31 de octubre de 2014 (AGUA)

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación [W/m ²]	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
11:20	10:21	1.008	22	21,7	18,4	18,4
11:30	10:31	1.022	27,5	27,6	20	18,6
11:40	10:41	1.035	34,1	34,1	20,2	18,9
11:50	10:51	1.045	40,7	40,7	20	20,6
12:00	11:01	1.045	48	48	20,8	19,7
12:10	11:11	1.048	53	53	20,8	19,2
12:20	11:21	1.055	57,7	57,7	20,5	19,2
12:30	11:31	1.060	62	62	20,9	19,9
12:40	11:41	1.053	65,9	65,9	20,5	20,9
12:50	11:51	1.064	69,2	69,2	21,2	20,2
13:00	12:01	1.056	72,3	72,2	21,5	20,7
13:10	12:11	1.039	74,6	74,5	21,9	20,2
13:20	12:21	1.011	76,1	76,1	21,6	21,6
13:30	12:31	1.007	77,7	77,6	22,1	20,9
13:40	12:41	996	78,5	78,4	21,9	21,5
13:50	12:51	994	78,8	78,8	22	21,3
14:00	13:01	981	78,8	78,7	21,9	21,8

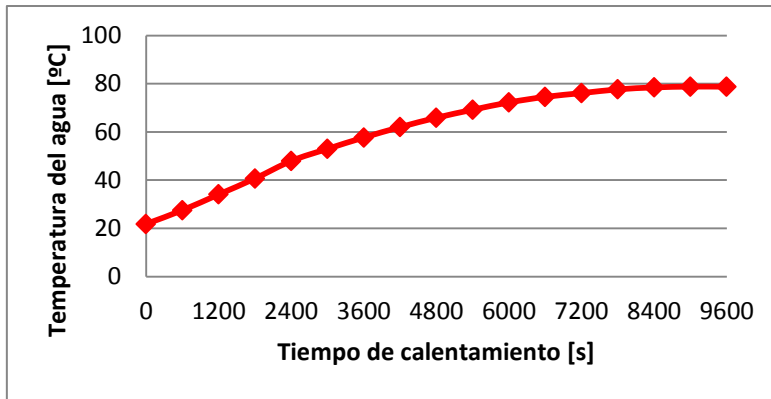


Gráfico 14. Perfil de calentamiento 31/10/2014 (AGUA).

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
14:00	13:01	78,8	78,7	21,9	21,8
14:10	13:11	73,5	73,3	20,9	20,5
14:20	13:21	68,1	68,1	21,2	20,9
14:30	13:31	63,3	63,1	21,4	21,5
14:40	13:41	59,3	59,2	21,8	21,7
14:50	13:51	55,8	55,7	21,6	21,4
15:00	14:01	52,5	52,4	21,5	21,3
15:10	14:11	48,7	49,6	21,7	21,6
15:20	14:21	47,3	47,3	21,3	21,2
15:30	14:31	45	45	21,8	21,9
15:40	14:41	43	43	21,9	21,7
15:50	14:51	41,4	41,4	22	22
16:00	15:01	39,9	39,9	21,8	21,7

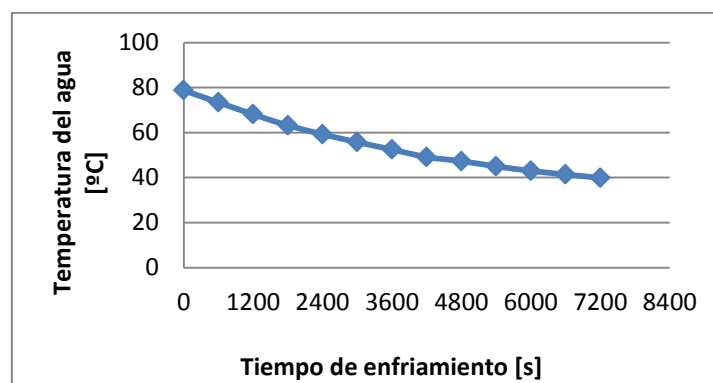


Gráfico 15. Perfil de enfriamiento 31/10/2014 (AGUA).

9. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE OTOÑO

Los resultados se han obtenido a partir de los datos mostrados anteriormente y se hallan en función de las distintas normativas. Así se calcula la **potencia útil** (Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos), las **figuras de mérito** (Oficina de Normas de la India) y el **rendimiento óptico** (Modelo Cero-dimensional).

Los datos se presentan en tablas. En éstas aparece la radiación media en el intervalo de medida, calculada como la media entre la radiación al comienzo y el final del intervalo. También la temperatura ambiente media del intervalo, resultado de la media entre las mediciones obtenidas en los dos termopares exteriores al principio y final del intervalo. Además aparece la temperatura media en el interior de la olla, resultado del promedio de las medidas obtenidas por los termopares ubicados en el interior.

Los resultados obtenidos en cada uno de los apartados, nos dan unos parámetros objetivos y experimentales con los que se completa la caracterización de la cocina. Además estos parámetros sirven para realizar comparaciones con otras cocinas solares.

Los datos y resultados presentados, no son extrapolables a otras cocinas solares.

9.1. CÁLCULO DE LAS CAPACIDADES TÉRMICAS

Dependiendo del parámetro a calcular, la capacidad térmica total de la que hay que hacer uso será una u otra. Por ello a continuación se presenta el modelo de cálculo de la capacidad térmica global para los distintos parámetros.

Para el cálculo de la capacidad térmica total, se necesita conocer las masas de la olla de metal, el cobertor, y el agua, en los casos en los que se use. Además también se deben conocer los calores específicos de los mismos.

- Olla de metal:
La parte metálica de la olla es acero. La pesada del utensilio reporta una masa de 0,6 kg. Se ha considerado un calor específico de 0,42 [kJ/kg·K].
- Cobertor de vidrio:
La parte exterior de vidrio tiene una masa de 2,7 kg. Su calor específico se ha considerado 0,72 [kJ/kg·K]. Como el cobertor no se calienta igual que el agua o la olla, hay que considerar un coeficiente de reducción. Por ello, la capacidad térmica del cobertor irá multiplicada por un coeficiente de reducción. El valor de este coeficiente se puede considerar 0,5 en primera aproximación, ya que el cobertor alcanzará una temperatura intermedia entre el interior y el ambiente.
- Agua:
En los ensayos en los que se usa agua, se hizo una medición de la masa antes de empezar y otra tras la experimentación. En ambos, se obtuvo 1,55 kg de agua al comienzo y 1,5 kg al final. Esta diferencia se debe al agua perdida en forma de vapor debido a la no estanqueidad de cierre de la olla provocada por los cables

de los termopares usados para el seguimiento de la temperatura del fluido. El calor específico considerado ha sido 4,19 [kJ/kg·K].

9.1.1. Potencia útil

En la norma en la que se considera el cálculo de la potencia útil (ASAE S580) no aparecen referencias a pérdidas de masa. Por ello, para el cálculo de dicha potencia se considera la masa de agua al inicio del ensayo. Esto se debe a que así se facilita la comparación de potencias con otros ensayos conociendo la masa inicial. Si se considerase la masa final, para poder hacer una comparación habría que repetir los ensayos hasta que las masas finales coincidiesen.

A continuación se calcula la capacidad térmica del agua, que es la necesaria para determinar la potencia útil según la norma. Además, se calcula la capacidad térmica de la cocina en vacío que se usará para calcular la potencia útil en vacío con un fin comparativo.

- Agua:

$$C_{lp} = m_{agua} \cdot c_{agua}$$

$$C_{lp} = 1,55 \cdot 4.190$$

$$C_{lp} = 6.494,5 \left[\frac{J}{K} \right]$$

- Vacío:

$$C_{vp} = m_{olla} \cdot c_{olla} + 0,5 \cdot (m_{cobertor} \cdot c_{cobertor})$$

$$C_{vp} = 0,6 \cdot 420 + 0,5 \cdot 2,7 \cdot 720$$

$$C_{vp} = 1.224 \left[\frac{J}{K} \right]$$

9.1.2. Resto de parámetros

Conocida la capacidad térmica usada en la potencia útil, se pasa a calcular las capacidades térmicas que se usan en el resto de parámetros como F_2 , AUF' o la eficiencia óptica η_0 .

En estos parámetros, el cálculo de la capacidad térmica se puede hacer sólo considerando la carga de la olla, es decir, la masa de agua o considerando además de esto, la masa de la olla y la aportación del cobertor.

Para estos parámetros, que se obtienen de balances energéticos, hay que considerar la evolución de la masa de agua. Debido a que no se ha instalado una célula de carga que hubiera permitido conocer la evolución instantánea de la masa de agua, se considera como masa de agua para los cálculos la media entre la masa inicial y la masa final. Atendiendo a los valores dados de masa inicial y final de agua, la masa media de agua durante el ensayo fue 1,525 kg. A continuación se procede al cálculo de las capacidades térmicas.

- Agua:

$$C_l = m_{agua} \cdot c_{agua}$$

$$C_l = 1,525 \cdot 4.190$$

$$C_l = 6.390 \left[\frac{J}{K} \right]$$

- Olla cargada de agua:

$$C = m_{agua} \cdot c_{agua} + m_{olla} \cdot c_{olla} + 0,5 \cdot (m_{cobertor} \cdot c_{cobertor})$$

$$C = 1,525 \cdot 4.190 + 0,6 \cdot 420 + 0,5 \cdot 2,7 \cdot 720$$

$$C = 7.614 \left[\frac{J}{K} \right]$$

9.2. SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)

La potencia de calentamiento no va a ser constante, puesto que tiende a disminuir según se acerca a su temperatura de estancamiento o de ebullición del líquido que se encuentra en el recipiente (la primera en llegar), siendo su valor cero cuando se alcanza dicho punto debido al efecto de las pérdidas de calor.

Debido a lo anterior, podremos hallar la **potencia útil normalizada** máxima de la cocina, $P_{s,máxima}$, que se obtiene cuando la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura interior sea cero. Así mismo, la norma indica que el valor de la potencia útil normalizada característica de la cocina se obtiene cuando la sobre-temperatura sea de 50 °C, $P_{s,50°C}$. **Al ser útil, se considera solamente la capacidad calorífica del agua sin considerar evaporación C_{lp} .**

Además, se presentan gráficos que relacionan la potencia normalizada con la sobre-temperatura para cada ensayo, y la correlación lineal obtenida de éstos.

9.2.1. Día 29 de octubre (AGUA)

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	Potencia útil normalizada [W]	Sobre-temperatura [°C]
11:50	22,3	975		-0,5
12:00	27,8	974	42,8	7,3
12:10	34,9	980,5	54,5	14,3
12:20	40,4	988	42,6	17,9
12:30	46,8	989,5	49	24,3
12:40	52,9	992	46,9	31,5
12:50	57,7	932	38,6	36,8
13:00	61,6	928	31,4	40,4
13:10	64,6	983	23,1	42,5
13:20	67,4	965,5	22,4	45,7
13:30	69,9	936,5	20,6	47,3
13:40	71,9	934,5	15,8	49,8
13:50	73,3	942	10,9	50,5
14:00	74,8	928,5	12,6	53,4
14:10	75,7	914	7,5	51,9
14:20	76,8	854,5	9,7	55

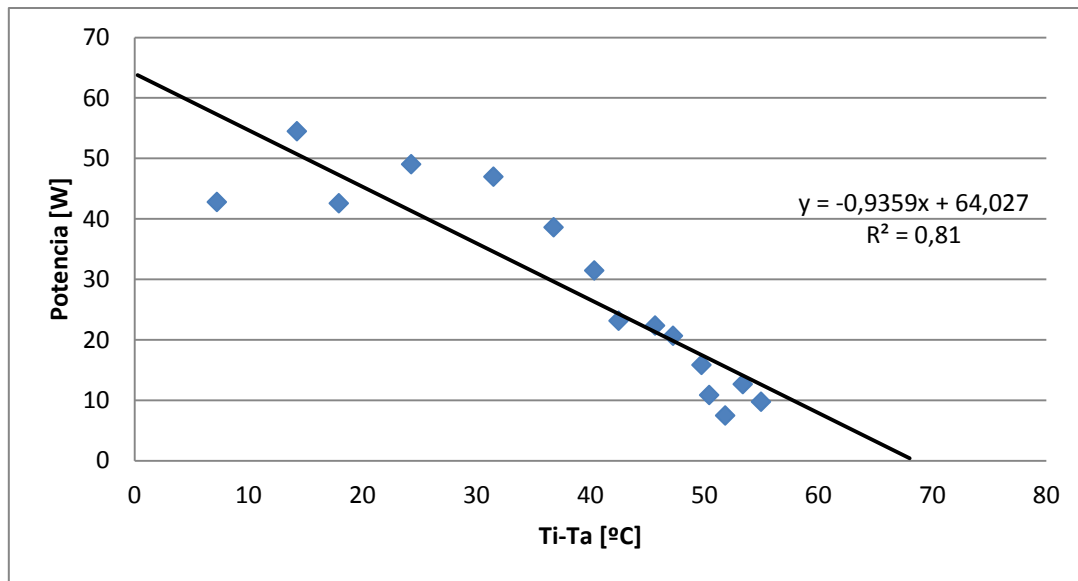


Gráfico 16. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 29/10/2014 (AGUA).

De la correlación lineal obtenida, podemos calcular:

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 64 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}C} = 17,2 \text{ W}$$

9.2.2. Día 30 de octubre (VACÍO)

Aunque la ASAE S580 indica que los ensayos deben hacerse con agua, aquí se considera también el ensayo en vacío con un fin comparativo.

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m²]	Potencia útil normalizada [W]	Sobre-temperatura [°C]
11:00	44,4	945		25,1
11:05	55,8	942	34,4	36,1
11:10	63,9	944,5	24,6	44,6
11:15	71	954	21,3	51,2
11:20	75,6	959,5	13,7	55,6
11:25	81,4	964	17	60,2

11:30	84,4	968,5	8,8	63,9
11:35	87,3	976,5	8,6	66,7
11:40	88,2	987	2,6	68,9
11:45	89,8	994,5	4,5	68,5
11:50	91,8	998	5,9	70
11:55	92,6	995,5	2,2	70,9
12:00	92,8	994,5	0,7	71,4
12:05	93,7	1.001,5	2,6	71,5
12:10	94,9	1.008,5	3,4	73,4
12:15	95,7	1.013,5	2,3	73,1
12:20	96,7	1.018,5	2,7	75,6
12:25	97,9	1.020,5	3,5	74,6
12:30	97,6	1.021,5	-0,8	74,9
12:35	98,4	1.021	2,2	74,5
12:40	98,4	1.019	0	74,6
12:45	97,5	1.018	-2,5	74,5

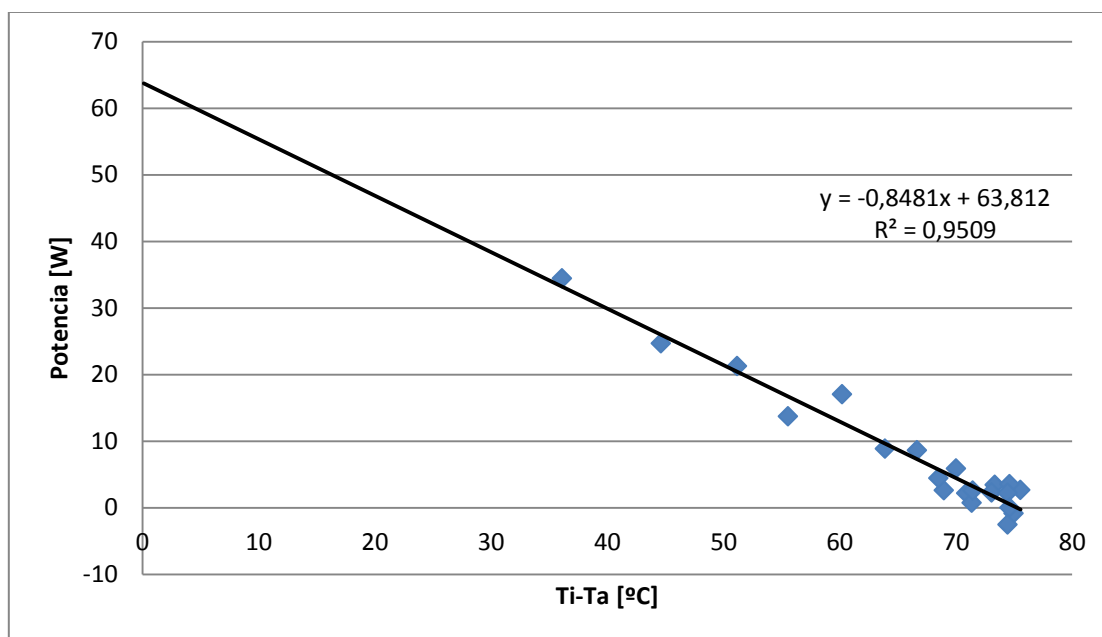


Gráfico 17. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 30/10/2014 (VACÍO).

De la correlación lineal obtenida, podemos calcular:

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 63,8 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}\text{C}} = 21,4 \text{ W}$$

9.2.3. Día 31 de octubre (AGUA)

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	Potencia útil normalizada [W]	Sobre-temperatura [°C]
11:20	21,9	1.008		3,5
11:30	27,6	1.015	42,6	8,3
11:40	34,1	1.028,5	48,3	14,6
11:50	40,7	1.040	48,1	20,4
12:00	48	1.045	52,9	27,8
12:10	53	1.046,5	36,2	33
12:20	57,7	1.051,5	33,9	37,9
12:30	62	1.057,5	30,8	41,6
12:40	65,9	1.056,5	27,9	45,2
12:50	69,2	1.058,5	23,6	48,5
13:00	72,3	1.060	21,8	51,2
13:10	74,6	1.047,5	16,6	53,5
13:20	76,1	1.025	11,5	54,5
13:30	77,7	1.009	11,6	56,2
13:40	78,5	1.001,5	6,1	56,8
13:50	78,8	995	2,7	57,2
14:00	78,8	987,5	-0,4	56,9

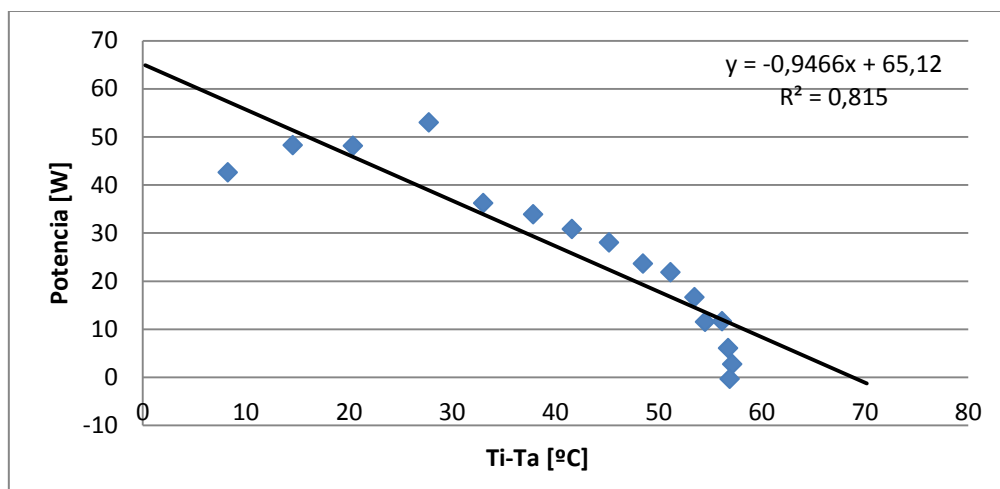


Gráfico 18. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 31/10/2014 (AGUA).

De la correlación lineal obtenida, podemos calcular:

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 65,1 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}\text{C}} = 17,8 \text{ W}$$

9.2.4. Comparación de los tres ensayos

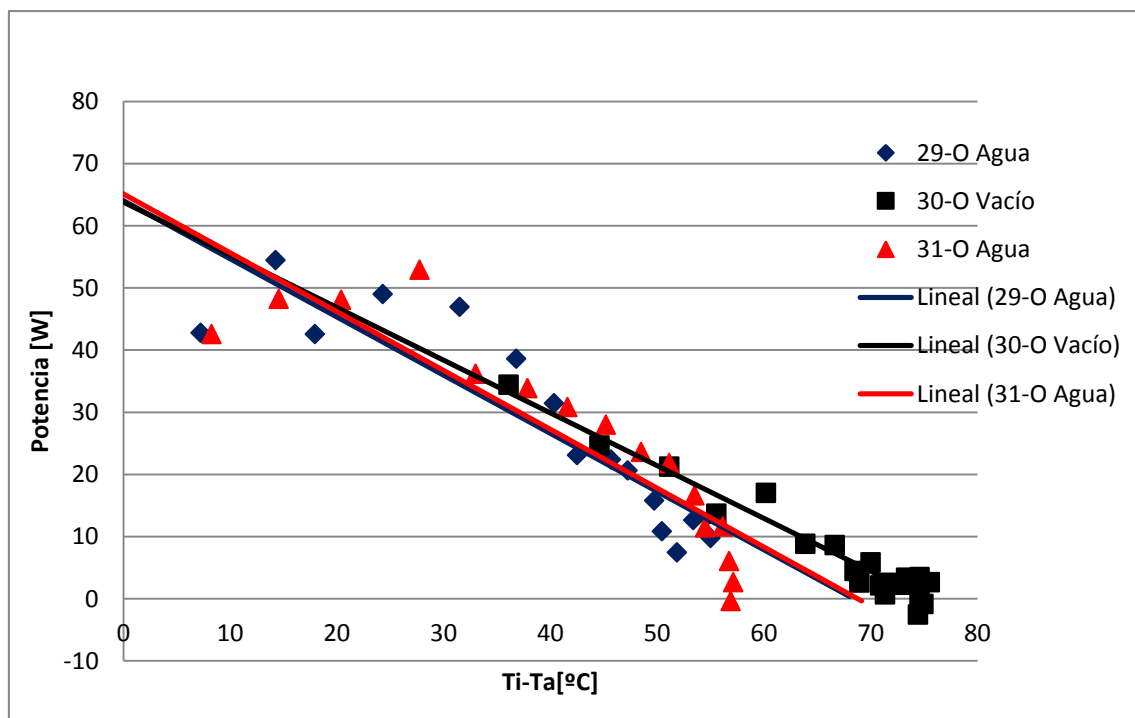


Gráfico 19. Comparación de la potencia normalizada frente a sobre-temperatura para los ensayos de otoño.

Como se puede observar en el gráfico, en las mediciones realizadas con la olla cargada, la potencia es parecida tanto en vacío como con la olla cargada.

- En el inicio, esto es cuando la sobre-temperatura es cero, la potencia en los tres casos es similar siendo la máxima diferencia de 1,3 W, que equivaldría a un 2% aproximadamente.
- Según se aumenta la sobre-temperatura, aumenta las diferencias entre el ensayo en vacío y los ensayos con carga. Las diferencias se deben a las distintas pérdidas de calor a las que está sometida la cocina. Estas pérdidas son similares, tanto en vacío como cargada, a excepción de las pérdidas por condensación en la

tapa y pérdidas de vapor de agua cuando la cocina está cargada. Por ello, según se va aumentando la sobre-temperatura comienzan a aumentar las diferencias.

9.3. OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA

En este apartado se calculan las dos figuras de mérito que indica esta norma. La primera de ellas, F_1 , se calcula en el ensayo en vacío, por lo que se ha explicado en el Apartado 5.2 correspondiente a esta norma. La segunda figura de mérito, F_2 , se calcula en los ensayos con la olla cargada.

Para el cálculo de estas figuras de mérito es necesario conocer la relación entre el área de colección de la olla y el área de apertura, ambas calculadas en el Apartado 7.

Las ecuaciones que representan las figuras de mérito vienen dadas en el Apartado 5.2.

9.3.1. Figura de mérito 1

- Día 30 de octubre (VACÍO)

Atendiendo a las temperaturas medidas en el interior de la olla en vacío, se hace una estimación de la temperatura de estancamiento T_{st} . Así, vemos que los datos de los que disponemos son los siguientes:

Hora real	Radiación (W/m^2)	T media ($^{\circ}C$)
12:25	1.021	97,9
12:30	1.022	97,6
12:35	1.020	98,4
12:40	1.018	98,4
12:45	1.018	97,5

Con esto, estimamos la temperatura de estancamiento haciendo la media de los valores anteriores:

$$T_{st} = 97,9 \text{ }^{\circ}C$$

Los valores de temperatura ambiente y radiación usados para este cálculo, son la media de los valores registrados durante todo el ensayo. Así tenemos:

$$T_a = 21,4 \text{ }^{\circ}C$$

$$G = 991 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Sustituyendo en F_1 :

$$F_1 = \frac{0,139}{0,213} \cdot \frac{97,9 - 21,4}{991}$$

$$F_1 = 0,050 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

9.3.2. Figura de mérito 2

En ambos apartados se presentan los datos de temperatura ambiente media en cada intervalo, así como la radiación media de cada intervalo.

9.3.2.1. Día 29 de octubre

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T _{ambiente} media intervalo [°C]	F_2
11:50	22,3	975	22,8	
12:00	27,8	974	21,7	0,296
12:10	34,9	980,5	20,6	0,419
12:20	40,4	988	21,5	0,356
12:30	46,8	989,5	22,5	0,447
12:40	52,9	992	21,9	0,488
12:50	57,7	932	21,2	0,485
13:00	61,6	928	21,1	0,449
13:10	64,6	983	21,6	0,336
13:20	67,4	965,5	21,9	0,361
13:30	69,9	936,5	22,2	0,380
13:40	71,9	934,5	22,4	0,318
13:50	73,3	942	22,5	0,229
14:00	74,8	928,5	22,1	0,302
14:10	75,7	914	22,6	0,193
14:20	76,8	854,5	22,8	0,337

A partir de lo anterior, podemos estimar el valor de F_2 como la media de los anteriores.

$$F_2 = 0,359$$

9.3.2.2. Día 31 de octubre

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T _{ambiente} media intervalo [°C]	F_2
11:20	21,9	1.008	18,4	
11:30	27,6	1.015	18,9	0,303
11:40	34,1	1.028,5	19,4	0,372
11:50	40,7	1.040	19,9	0,406
12:00	48	1.045	20,3	0,498
12:10	53	1.046,5	20,1	0,383
12:20	57,7	1.051,5	19,9	0,396
12:30	62	1.057,5	20,1	0,396
12:40	65,9	1.056,5	20,6	0,394
12:50	69,2	1.058,5	20,7	0,365
13:00	72,3	1.060	20,9	0,367
13:10	74,6	1.047,5	21,1	0,310
13:20	76,1	1.025	21,3	0,237
13:30	77,7	1.009	21,6	0,264
13:40	78,5	1.001,5	21,6	0,147
13:50	78,8	995	21,7	0,068

A partir de lo anterior, podemos estimar el valor de F_2 como la media de los anteriores, pero sin considerar el último resultado (13:50 h) ya que la variación de temperatura con respecto al anterior es muy pequeña, y nos indica la cercanía a la temperatura de estancamiento de la olla cuando está cargada.

$$F_2 = 0,346$$

9.4. DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL

En el desarrollo de este modelo se seguirán los pasos especificados en el Apartado 5.4, correspondiente a la norma.

El primer paso es la obtención de la curva de enfriamiento a partir de los datos obtenidos en las mediciones. Sólo se tienen en cuenta las mediciones realizadas con la olla cargada. Con esta curva, obtenemos el tiempo de enfriamiento característico.

En el apartado de la norma se presentaban dos maneras de calcular el tiempo característico, primer orden y segundo orden centrado. En este apartado se calcula la de segundo orden centrado, ya que rechaza mejor el ruido y es más exacto.

9.4.1. Cálculo del tiempo característico t_0

9.4.1.1. Día 29 de octubre (AGUA)

Hora real	T media [°C]	T _{ambiente} media [°C]	t_0 [s]
14:20	76,8	21,8	
14:30	72,6	22,1	6.517
14:40	67,7	22,8	5.526
14:50	62,8	22,6	6.343
15:00	59,9	22,7	6.959
15:10	56,4	22,6	6.349
15:20	53,4	22,6	6.297
15:30	50,5	22,3	7.134
15:40	48,6	22,4	7.609
15:50	46,4	22,3	7.053
16:00	44,5	22,4	

A partir de estos valores, se puede dar un valor característico para el tiempo de enfriamiento. Haciendo la media, obtenemos un valor de:

$$t_0 = 6.643 \text{ s} \approx 1,85 \text{ h}$$

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento de t_0 en función del tiempo transcurrido de enfriamiento.

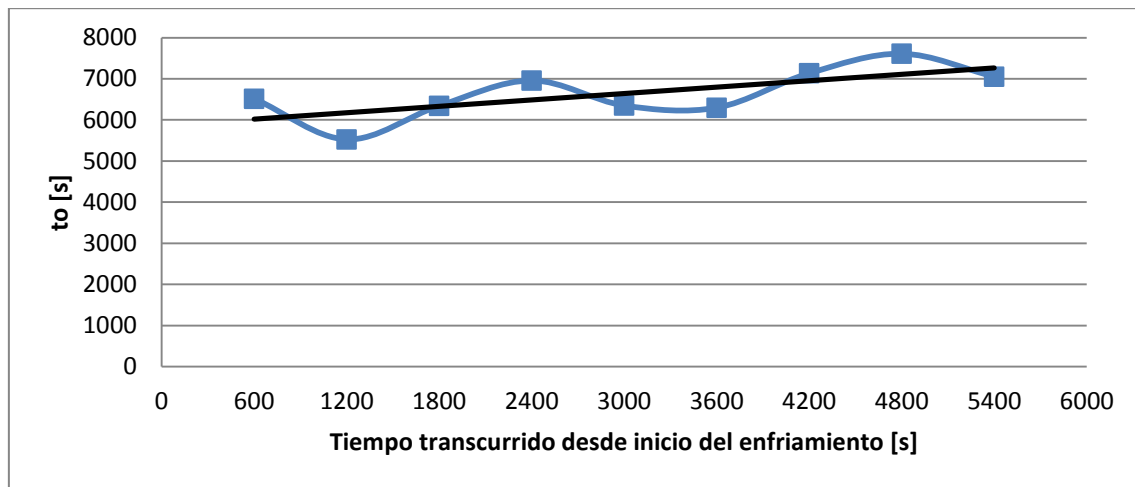


Gráfico 20. Evolución de t_0 con el tiempo 29/10/2014 (AGUA).

Como se puede comprobar, el valor de t_0 aumenta al aumentar el tiempo de enfriamiento debido a que la diferencia de temperaturas entre el interior de la olla y la temperatura ambiente, va disminuyendo, lo que hace disminuir el valor de U , fundamentalmente debido a convección natural.

9.4.1.2. Día 31 de octubre (AGUA)

Hora real	T media [°C]	T _{ambiente} media [°C]	t_0 [s]
14:00	78,8	21,9	
14:10	73,4	20,7	5.826
14:20	68,1	21,1	5.479
14:30	63,2	21,5	5.692
14:40	59,3	21,8	6.091
14:50	55,8	21,5	6.035
15:00	52,5	21,4	5.599
15:10	49,2	21,7	6.584
15:20	47,3	21,3	7.368
15:30	45	21,9	6.571
15:40	43	21,8	7.204
15:50	41,4	22	7.692
16:00	39,9	21,8	

A partir de estos valores, se puede dar un valor característico para el tiempo de enfriamiento. Haciendo la media, obtenemos un valor de:

$$t_0 = 6.377 \text{ s} \approx 1,77 \text{ h}$$

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento de t_0 en función del tiempo transcurrido de enfriamiento.

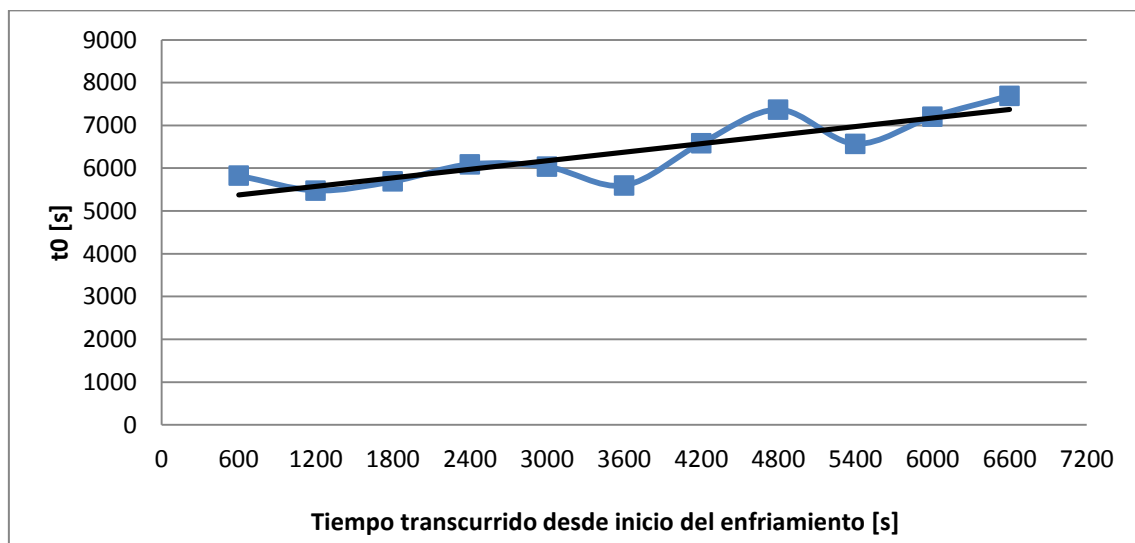


Gráfico 21. Evolución de t_0 con el tiempo 31/10/2014 (AGUA).

Como se puede comprobar, el comportamiento es el mismo que en el ensayo anterior como cabía esperar.

9.4.2. Cálculo del coeficiente de pérdidas AUF'

Conocido el valor de t_0 , se puede entrar en su propia ecuación con la finalidad de obtener el coeficiente de pérdidas AUF' . Para ello, se hace uso de la capacidad térmica efectiva total hallada en el Apartado 9.1.

$$C = 7.614 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$$

9.4.2.1. Día 29 de octubre

Hora real	T media [°C]	T_{ambiente} media [°C]	t_o [s]	AUF' [W/K]
14:20	76,8	21,8		
14:30	72,6	22,1	6.517	1,17
14:40	67,7	22,8	5.526	1,38
14:50	62,8	22,6	6.343	1,20
15:00	59,9	22,7	6.959	1,09
15:10	56,4	22,6	6.349	1,19
15:20	53,4	22,6	6.297	1,21
15:30	50,5	22,3	7.134	1,07
15:40	48,6	22,4	7.609	1,00
15:50	46,4	22,3	7.053	1,08
16:00	44,5	22,4		

A partir de estos resultados, se puede dar un valor medio a AUF' durante este ensayo, que es la media de los valores presentados:

$$AUF' = 1,16 \left[\frac{W}{K} \right]$$

A continuación se presenta un gráfico del comportamiento de AUF' en función del tiempo de enfriamiento.

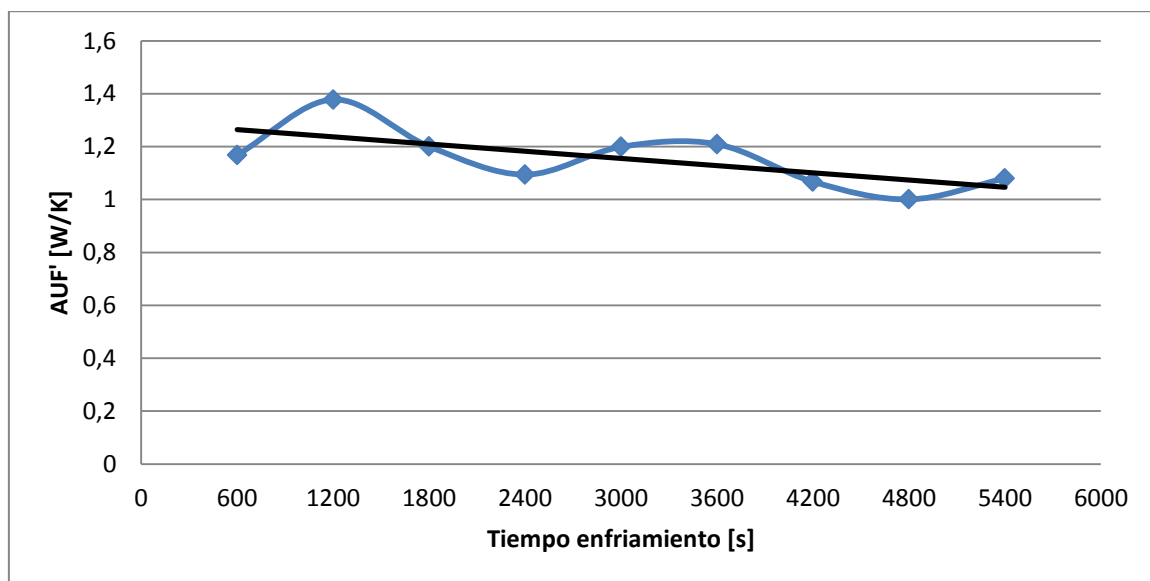


Gráfico 22. Evolución de AUF' con el tiempo 29/10/2014 (AGUA).

Puede observarse una evolución lógica, descendiente con el tiempo, pues desciende la diferencia de temperatura y la evaporación.

9.4.2.2. Día 31 de octubre

Hora real	T media [°C]	T _{ambiente} media [°C]	t _o [s]	AUF' [W/K]
14:00	78,8	21,9		
14:10	73,4	20,7	5.826	1,31
14:20	68,1	21,1	5.479	1,39
14:30	63,2	21, 5	5.692	1,34
14:40	59,3	21,8	6.091	1,25
14:50	55,8	21,5	6.035	1,26
15:00	52, 5	21,4	5.599	1,36
15:10	49,2	21,7	6.584	1,16
15:20	47,3	21,3	7.368	1,03
15:30	45	21,9	6.571	1,16
15:40	43	21,8	7.204	1,06
15:50	41,4	22	7.692	0,99
16:00	39,9	21,8		

A partir de estos resultados, se puede dar un valor medio a AUF' durante este ensayo, que es la media de los valores presentados:

$$AUF' = 1,21 \left[\frac{W}{K} \right]$$

A continuación se presenta un gráfico del comportamiento de AUF' en función del tiempo de enfriamiento.

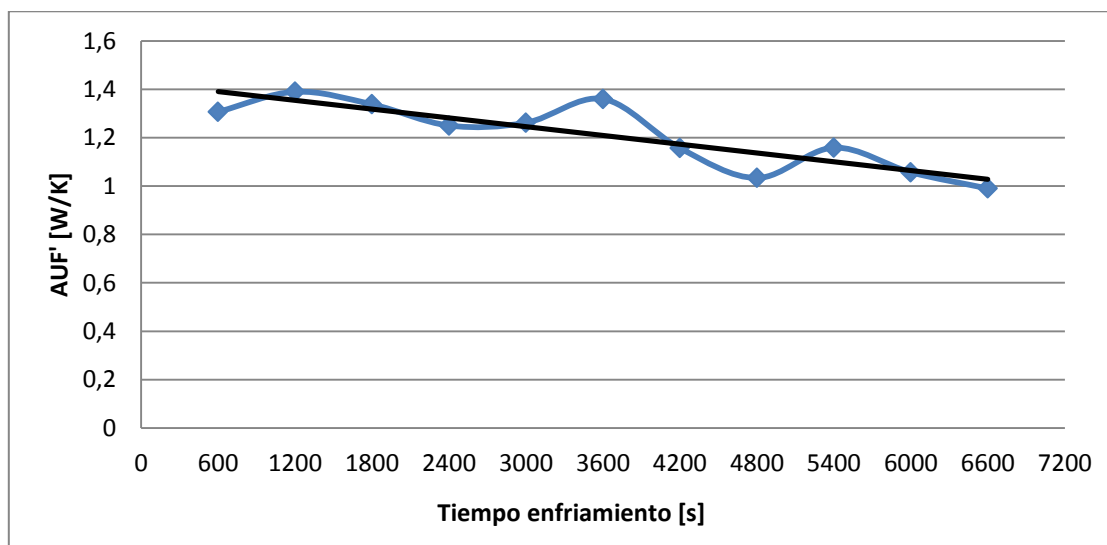


Gráfico 23. Evolución de AUF' con el tiempo 31/10/2014 (AGUA).

En ambos gráficos, la tendencia de la variable AUF' es la esperada. Esta tendencia se debe únicamente a la variable U , ya que tanto A como F' se comportan de forma constante. La variable U hace referencia al coeficiente global de transferencia de calor. La disminución de U con el tiempo de enfriamiento se explica por el mismo motivo que el aumento del tiempo de enfriamiento. Con el transcurrir del tiempo, el gradiente de temperaturas olla-ambiente va disminuyendo. Esto provoca un menor intercambio de energía en forma de calor entre la olla y los alrededores, dando como resultado la disminución de U y el aumento de t_0 .

9.4.3. Cálculo de la eficiencia óptica η_0

Esta eficiencia, se determina con los ensayos hechos con la olla cargada de agua. La ecuación a partir de la cual podemos obtener los valores de la eficiencia óptica aparece en el Apartado 5.4 correspondiente al modelo cero-dimensional. Podemos observar que disponemos de todas las variables que aparecen. Tanto A_a como C son las halladas anteriormente. El valor de t_0 usado es el valor medio de cada ensayo, dado anteriormente.

9.4.3.1. Día 29 de octubre

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m^2]	T_{ambiente} media intervalo [°C]	Eficiencia óptica η_0
11:50	22,3	975	22,8	
12:00	27,8	974	21,7	0,355
12:10	34,9	980,5	20,6	0,487
12:20	40,4	988	21,5	0,422
12:30	46,8	989,5	22,5	0,500
12:40	52,9	992	21,9	0,520
12:50	57,7	932	21,2	0,500
13:00	61,6	928	21,1	0,471
13:10	64,6	983	21,6	0,408
13:20	67,4	965,5	21,9	0,421
13:30	69,9	936,5	22,2	0,429
13:40	71,9	934,5	22,4	0,403
13:50	73,3	942	22,5	0,371
14:00	74,8	928,5	22,1	0,400
14:10	75,7	914	22,6	0,368
14:20	76,8	854,5	22,8	0,413

Haciendo la media de los valores de eficiencia óptica a lo largo de todo el ensayo, obtenemos el valor característico de eficiencia óptica.

$$\eta_0 = 0,431$$

9.4.3.2. Día 31 de octubre

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T_{ambiente} media intervalo [°C]	Eficiencia óptica η_0
11:20	21,9	1.008	18,4	
11:30	27,6	1.015	18,9	0,367
11:40	34,1	1.028,5	19,4	0,442
11:50	40,7	1.040	19,9	0,472
12:00	48	1.045	20,3	0,545
12:10	53	1.046,5	20,1	0,447
12:20	57,7	1.051,5	19,9	0,455
12:30	62	1.057,5	20,1	0,453
12:40	65,9	1.056,5	20,6	0,45
12:50	69,2	1.058,5	20,7	0,434
13:00	72,3	1.060	20,9	0,435
13:10	74,6	1.047,5	21,1	0,411
13:20	76,1	1.025	21,3	0,385
13:30	77,7	1.009	21,6	0,399
13:40	78,5	1.001,5	21,6	0,363
13:50	78,8	995	21,7	0,342
14:00	78,8	987,5	21,8	0,320

Haciendo la media de los valores de eficiencia óptica a lo largo de todo el ensayo, obtenemos el valor característico de eficiencia óptica.

$$\eta_0 = 0,419$$

Puede observarse una consistencia en los resultados de ambos días.

9.5. UNIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado, se dan los valores únicos que se consideran característicos tras los ensayos realizados. Estos valores pueden diferir de otros obtenidos en condiciones climáticas distintas.

Estos resultados, nos serán útiles con la finalidad de hacer comparaciones con otras cocinas.

Posteriormente, se lleva a cabo una simulación en un mes de verano, julio, y se consideran algunos de los valores obtenidos en este apartado, a pesar de la diferencia en las condiciones climáticas.

9.5.1. SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)

En este apartado se da un valor característico de la potencia útil, según dicha norma. Esta se considerará la potencia útil característica de la cocina. Además se hace una representación de la potencia útil frente a la sobre-temperatura. Gracias a esa representación se puede obtener la potencia útil máxima, que se determina cuando la sobre-temperatura es cero.

Para obtener todos estos resultados se representan todas las mediciones con la olla cargada y se realiza un ajuste lineal. A partir del ajuste lineal se obtiene el valor de la potencia útil según la norma, sobre-temperatura de 50 °C, y el de la potencia útil máxima.

A continuación se muestra el gráfico obtenido.

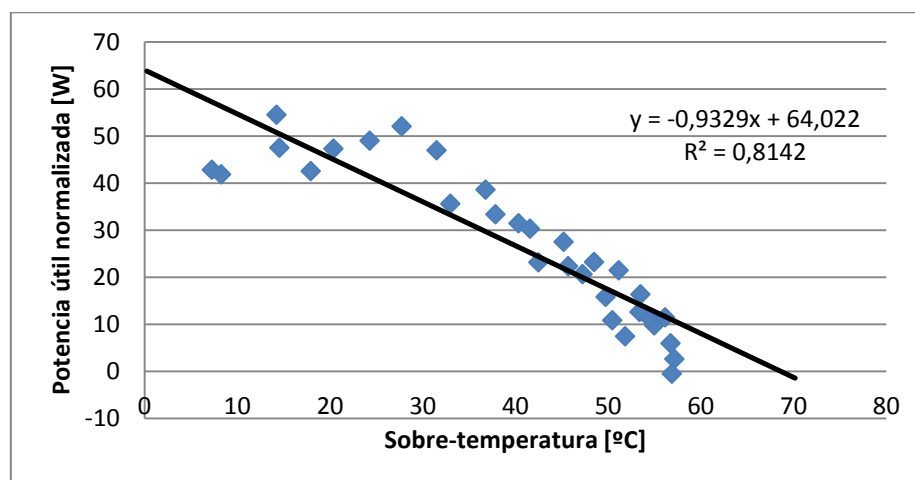


Gráfico 24. Potencia útil normalizada frente a sobre-temperatura en otoño.

Con esto, obtenemos los valores anteriormente indicados.

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 64,0 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}C} = 17,4 \text{ W}$$

9.5.2. OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA

En este apartado, se da un único valor para las figuras de mérito F_1 y F_2 .

9.5.2.1. Figura de mérito 1

Debido a que sólo se ha realizado un ensayo en las condiciones necesarias para el cálculo de F_1 , el valor obtenido anteriormente es el valor característico para la cocina.

$$F_1 = 0,050 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

9.5.2.2. Figura de mérito 2

Para calcular el valor característico de F_2 , se realiza la media de los valores obtenidos en los ensayos con la olla cargada. Así se obtiene el siguiente valor del parámetro F_2 .

$$F_2 = 0,353$$

9.5.3. DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL

En este apartado, se da un único valor al tiempo característico de enfriamiento t_0 , al coeficiente de pérdidas AUF' y a la eficiencia óptica η_0 . La obtención del valor único es mediante la media de los valores obtenidos en los ensayos expuestos anteriormente.

9.5.3.1. Tiempo característico t_0

$$t_0 = 6.509 \text{ s} \approx 1,81 \text{ h}$$

9.5.3.2. Coeficiente de pérdidas AUF'

$$AUF' = 1,18 \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$$

9.5.3.3. Eficiencia óptica η_0

$$\eta_0 = 0,425$$

10. SIMULACIÓN PARA EL MES DE JULIO

10.1. DATOS DE PARTIDA

En este apartado, se lleva a cabo una simulación de la cocina en el mes de julio partiendo de los datos obtenidos de los ensayos en el mes de octubre, resumidos en la siguiente tabla:

Tiempo característico t_0 [s]	Coefficiente de pérdidas AUF' [W/K]	Eficiencia óptica η_0 [-]
6.509	1,18	0,425

Estos datos fueron obtenidos para una cantidad media de agua de 1,525 L. Por lo tanto, en esta simulación se considera que la cantidad media de agua que es calentada es la misma. Se consideran unas pérdidas similares de evaporación y con el fin de poder calcular la potencia útil se considerará, al igual que en los ensayos de octubre, una masa inicial de agua de 1,55 kg.

De “**Photovoltaic Geographical Information System**” (PVGIS) se han obtenido los datos de radiación global media diaria para el mes de julio, en el lugar donde se realizan los ensayos. (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>).

Esta radiación tiene en cuenta tanto la parte directa como la difusa, ya que nuestra cocina es capaz de aprovechar ambas.

La altura solar media en ese mes, en las horas de ensayo que serían ± 2 horas el mediodía solar, está en torno a 70° . Por tanto el área de apertura correspondiente es de $0,436 \text{ m}^2$.

Conociendo el dato de la altura solar, se obtiene una inclinación del plano de la cocina, perpendicular a los rayos solares, de 20° . Esta inclinación es la que se inserta en la interfaz de **PVGIS** (*Inclination*) para la obtención de la radiación global en ese plano. Además se obtienen datos para distintos ángulos azimutales (*Orientation*), desde -30° hasta 30° , con lo que se pretende simular la reorientación de la cocina. Así, se utilizan los datos relativos a las horas correspondientes al ángulo azimutal en cada caso.

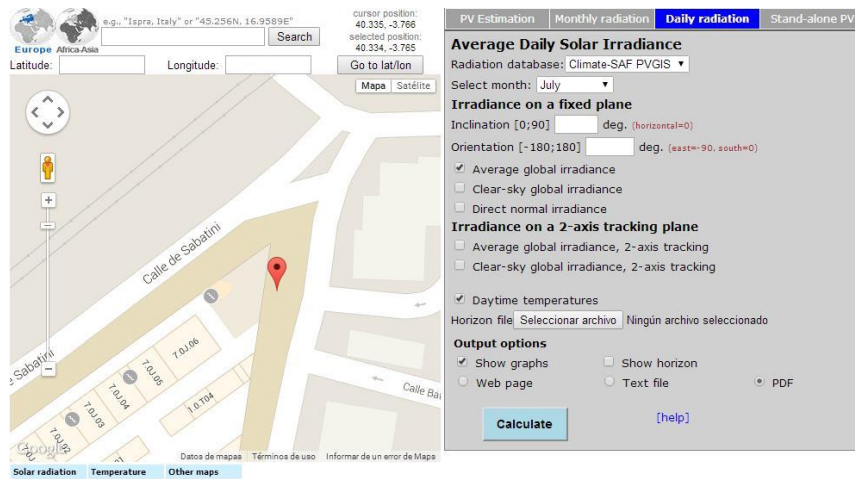


Figura 27. Interfaz de PVGIS

Fuente: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>,
accedido en marzo de 2015

En el Anexo 4 se presentan las tablas obtenidas con **PVGIS** que nos permiten conocer la radiación y la temperatura ambiente. Debido a que se han considerado distintos ángulos acimutales, de cada tabla se considerarán las horas correspondientes a esos ángulos, sabiendo que para un ángulo azimutal de 0° nos encontraremos en el mediodía solar y que cada 15° se aumentará una hora, aproximadamente.

La simulación se ha hecho con la curva de calentamiento teórica reemplazando AU_c por AUF'_{en} y t'_0 por t_0 , ya que al no disponer de los valores de AU_c y t'_0 , se puede realizar esta aproximación, según *Fundamentos de cocinas solares*. Se han ido obteniendo las temperaturas a partir de una temperatura inicial. Quedando la siguiente relación:

$$T_2 = T_a + (T_1 - T_a)e^{-\frac{t_2 - t_1}{t_0}} + \frac{A_a \cdot G \cdot \eta_0}{AUF'_{en}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2 - t_1}{t_0}}\right)$$

Se hacen dos simulaciones con dos temperaturas de agua iniciales. La primera simulación considera una temperatura de agua inicial de 27,2 °C. Ésta es la temperatura ambiente del primer intervalo. Al considerarla igual a la temperatura inicial del agua se evita ganancia por transferencia de calor con el ambiente en la simulación. La segunda simulación considera una temperatura inicial del agua de 20 °C. Ésta es la temperatura del agua de red obtenida del CTE para el mes de julio. Con esta simulación, habrá un instante inicial donde el agua se calentará en parte gracias al intercambio de calor con el ambiente. Esta última simulación pretende predecir el calentamiento del agua desde que sale de la red.

En ambas simulaciones se obtiene el perfil de calentamiento y la potencia útil según la norma ASAE S580. Los datos y resultados son los siguientes.

10.2. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN

Hora solar	Radiación global plano 70° [W/m ²]	Temperatura ambiente [°C]	Radiación media intervalo G [W/m ²]	Temperatura ambiente media intervalo T _a [°C]
10:07	938	27	938	27
10:22	961	27,4	949,5	27,2
10:37	981	27,8	971	27,6
10:52	996	28,1	988,5	27,9
11:07	1.010	28,4	1.003	28,3
11:22	1.010	28,7	1.010	28,6
11:37	1.010	29	1.010	28,9
11:52	1.020	29,2	1.015	29,1
12:07	1.020	29,5	1.020	29,4
12:22	1.020	29,8	1.020	29,7
12:37	1.010	30	1.015	29,9
12:52	1.010	30,2	1.010	30,1
13:07	1.010	30,4	1.010	30,3
13:22	995	30,6	1.002,5	30,5
13:37	979	30,8	987	30,7
13:52	959	31	969	30,9
14:07	961	31,2	960	31,1

Hora solar (h)	Temperatura del agua 1ª simulación [°C]	Temperatura del agua 2ª simulación [°C]
10:07	27,2	20
10:22	46,4	40,2
10:37	63,6	58,2
10:52	79	74,3
11:07	92,8	88,7
11:22	105	101,4
11:37	115,6	112,5
11:52	125	122,3
12:07	133,3	130,9
12:22	140,6	138,5
12:37	146,9	145
12:52	152,3	150,6
13:07	157	155,5
13:22	161	159,7
13:37	164,2	163
13:52	166,6	165,6
14:07	168,5	167,7

Hora solar (h)	Potencia útil normalizada 1ª simulación [W]	Potencia útil normalizada 2ª simulación [W]	Sobre-temperatura 1ª simulación [°C]	Sobre-temperatura 2ª simulación [°C]
10:07			0,2	-7
10:22	102,1	107,5	19,2	13
10:37	89,5	93,6	36	30,6
10:52	78,7	82,3	51,1	46,4
11:07	69,5	72,5	64,6	60,5
11:22	61	63,5	76,5	72,9
11:37	53	55,5	86,8	83,7
11:52	46,8	48,8	95,9	93,2
12:07	41,1	42,6	103,9	101,6
12:22	36,2	37,6	110,9	108,9
12:37	31,4	32,3	117	115,1
12:52	27	28	122,2	120,5
13:07	23,5	24,5	126,7	125,2
13:22	20,2	21,2	130,5	129,2
13:37	16,4	16,9	133,5	132,3
13:52	12,5	13,6	135,7	134,7
14:07	10	11	137,4	136,6

Se observa que la temperatura del agua llega a la de ebullición. Como la temperatura de ebullición está en torno a 98 °C y queda entre medias de un intervalo, se considera el punto inmediatamente superior a esta temperatura a pesar de superarla. A partir de ese punto, los resultados no han sido considerados en las gráficas. En las tablas, aparecen tachados los datos no considerados para los cálculos.

El perfil de calentamiento es el siguiente:

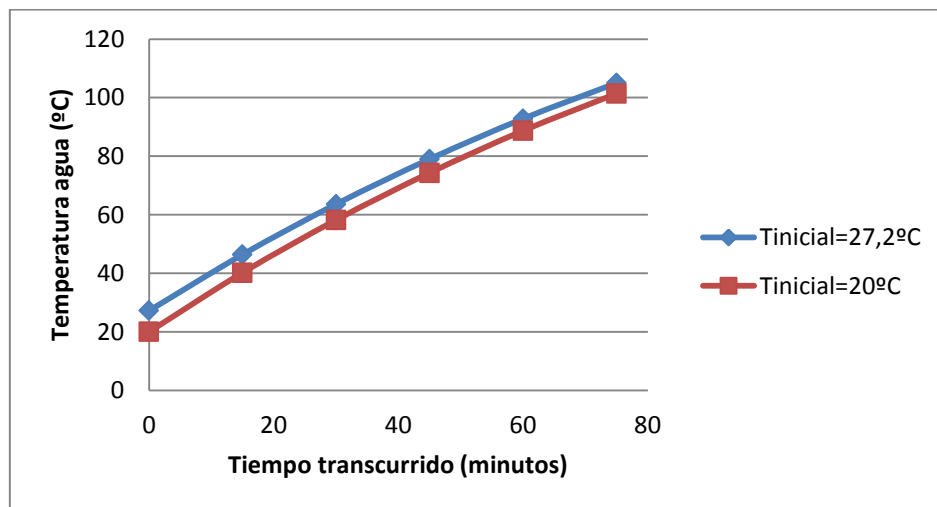


Gráfico 25. Perfil de calentamiento de las simulaciones de julio.

De estos perfiles se puede obtener el tiempo necesario para llevar a ebullición el agua. Sabiendo que la temperatura de ebullición del agua está en torno a los 98 °C, se obtiene un tiempo que de media para ambos ensayos es aproximadamente 70 minutos.

Estos resultados se aproximan a lo indicado en la página web <http://www.cocinasolar.org/cocinas/olla-solar-hot-pot>. Aquí se asegura que se puede hervir un litro de agua en menos de una hora en un día soleado. Como esta simulación está hecha para 1,525 L de agua, con una simple regla de tres se puede estimar el tiempo que tardaría en hervir un litro de agua, que estaría en torno a 45 minutos.

Para la potencia útil, se ha hecho una correlación lineal con los resultados de las dos simulaciones. El resultado es:

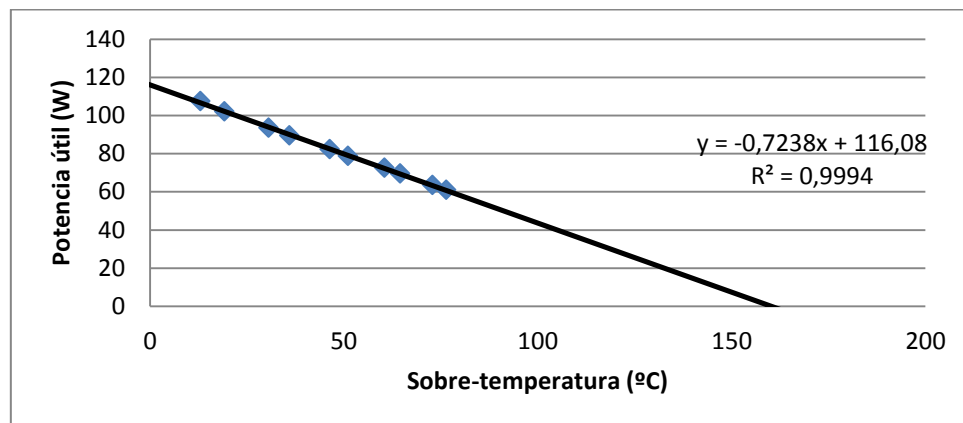


Gráfico 26. Potencia útil normalizada frente a sobre-temperatura en la simulación.

La sobre-temperatura de estancamiento es de 160,4 °C. La temperatura ambiente media de los datos considerados es de 28 °C. Con ambos resultados se puede obtener la temperatura de estancamiento como la suma directa de ambas, obteniendo así un valor de 188,4 °C. Obviamente con agua nunca se llegaría a esa temperatura por la cantidad de calor necesaria en la evaporación, pero eventualmente sí con aceite.

En la guía de usuario de la cocina Hot Pot, incluida en el Anexo 1, se dice que la temperatura óptima para cocinar con la cocina es de 100°C a 135°C, se supone entonces que estas temperaturas pueden ser alcanzadas entonces por la cocina cargada con alimentos. Con lo cual no sería muy extraño que se pudiera llegar a unos 188,4 °C de temperatura con la cocina en vacío, que sería la temperatura de estancamiento.

Éste sería un resultado no demasiado alejado al de la cocina parabólica (Miguel Manchado Megía: ‘Caracterización de una cocina solar parabólica’. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III. 2010). En este estudio se calculó la temperatura de estancamiento con aceite, obteniéndose un resultado de 226 °C.

Se puede estimar la potencia máxima útil normalizada y la potencia característica útil normalizada según ASAE, cuando la sobre-temperatura es 50°C, obteniendo los siguientes valores.

Potencia útil máxima $P_{s,máxima}$ [W]	Potencia útil característica $P_{s,50\text{ }^{\circ}\text{C}}$ [W]
116,1	79,9

Los valores obtenidos en los ensayos fueron:

Potencia útil máxima $P_{s,máxima}$ [W]	Potencia útil característica $P_{s,50\text{ }^{\circ}\text{C}}$ [W]
64	17,4

Los valores obtenidos en la simulación, son considerablemente diferentes de los obtenidos en los ensayos, debido principalmente a las condiciones climáticas (en torno a 8°C de diferencia en la temperatura ambiente) y área de apertura (casi un 90% mayor en julio que en octubre). Los valores de la radiación solar son bastante parecidos, de media, tanto en los ensayos como en la simulación.

10.3. COMPROBACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON LOS ENSAYOS HECHOS EL 29 DE JUNIO Y EL 1 DE JULIO

A continuación, se presentan los perfiles de calentamiento obtenidos en los ensayos realizados los días 29 de junio y 1 de julio y se compararán con los obtenidos en las simulaciones. La cantidad inicial de agua usada en estos ensayos es de 1,5 kg, similar a la considerada en las simulaciones que era de 1,55 kg.

Con esta comparación, se pretende comprobar la validez de los parámetros calculados en otoño, en los que se basan las simulaciones. En caso de observar diferencias apreciables en los perfiles de calentamiento, se procederá a recalcular dichos parámetros para las condiciones meteorológicas de verano.

Los perfiles de calentamiento de los ensayos y las simulaciones se presentan a continuación.

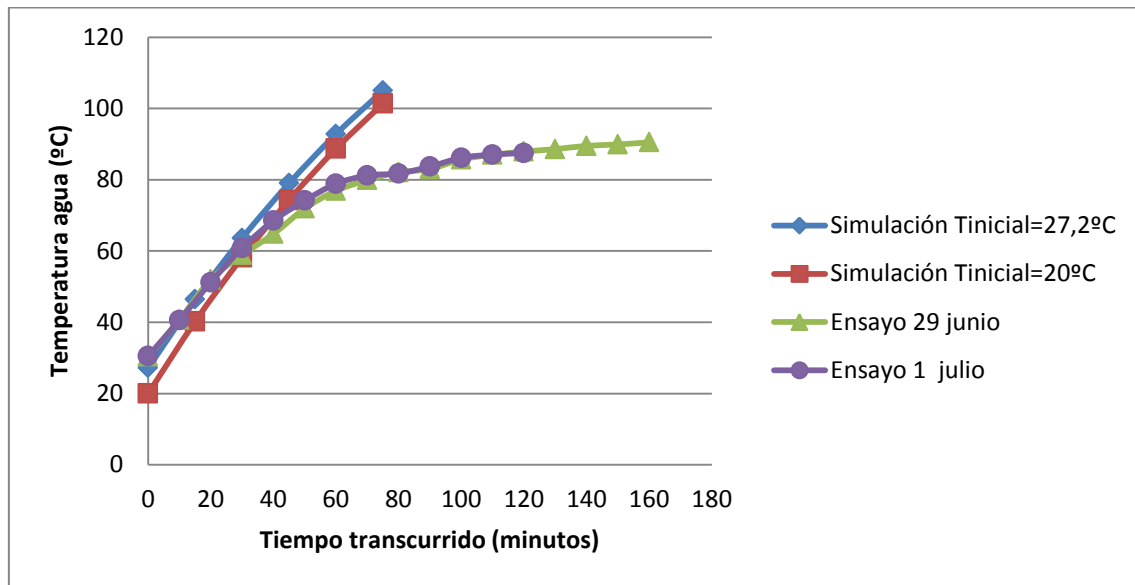


Gráfico 27. Comparación de los perfiles de calentamiento de las simulaciones y los ensayos.

Como puede observarse, el comportamiento en las simulaciones y los ensayos es similar hasta el minuto 40 aproximadamente. A partir de ese minuto, la pendiente obtenida en la simulación se mantiene prácticamente constante, mientras que la obtenida en los ensayos va disminuyendo hasta ser muy cercana a cero en los intervalos finales. Se observa además, que en los ensayos no se alcanza la temperatura de ebullición.

Las posibles causas de estas diferencias podrían ser atribuidas:

- Las distintas condiciones climatológicas, ya que es muy complicado obtener exactamente las mismas condiciones que en las simulaciones. Mientras la temperatura ambiente media de las simulaciones se encuentra en torno a 28 °C, durante los ensayos esta temperatura es de 36,5 °C aproximadamente.
- En el caso de los ensayos, la altura solar media durante los mismos fue de 65°, lo que supone un área de apertura de 0,389 m². Esta área es el 89,2 % del área considerado en las simulaciones lo que podría explicar parte de las diferencias. Además, la radiación media en las simulaciones es de 983 W/m² mientras en los ensayos fue de 1020 W/m².
- Las pérdidas por evaporación crecen exponencialmente según se aproxima la temperatura de ebullición. Cabe la posibilidad de que estas pérdidas sean mayores en estos ensayos. El escape de vapor depende mucho del área libre para ello entre tapa y olla y ella depende del ajuste espontáneo entre ambos. Dado que es imposible saber qué área ha quedado libre, es posible que en estos

ensayos haya sido mayor. Por otra parte, la humedad relativa en verano en Madrid es mucho menor que en otoño, por lo que la difusión del vapor de agua es mucho mayor en verano.

- Se constata en la literatura una alta variabilidad de los resultados de ensayos experimentales, por causas como las descritas y otras no tenidas en cuenta, como el deterioro en el uso y la distinta ejecución involuntaria de los ensayos.

Por lo tanto, mientras que la altura solar podría explicar en parte las menores temperaturas obtenidas en los ensayos, tanto temperatura ambiente como radiación deberían contrarrestar estas diferencias y al menos, igualar las temperaturas obtenidas con las simulaciones. El hecho de que esto no suceda, plantea la invalidez de estos parámetros para las condiciones de verano, especialmente a temperaturas altas, mientras que a bajas temperaturas la validez queda demostrada. Esto implica que los parámetros deban ser recalculados para las nuevas condiciones.

11. DATOS EXTRAIDOS DE LOS ENSAYOS DE VERANO

En este apartado se incluyen los datos obtenidos en las mediciones realizadas durante los días 29 y 30 de junio y el 1 de julio. La localización de todas las mediciones es el campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid (Latitud: 40.334 N Longitud: -3.765 E) (*Fuente: Google Maps*).

En cada uno de los días, se ha realizado un ensayo de calentamiento y otro de enfriamiento, según marca la teoría de un modelo 0D que permite caracterizar completamente las prestaciones de la cocina. Además para cada día se indica si el ensayo se ha realizado con carga (AGUA) o en vacío (VACÍO). Esto permite hallar los distintos parámetros según las distintas normas.

Para obtener los máximos valores de radiación solar, los ensayos se han realizado en las horas centrales del día, entorno a ± 2 horas del mediodía solar (14:00 hora local aproximadamente). Además de los valores máximos de radiación, se obtiene una variación pequeña y lenta de la radiación, que favorece el cálculo de los parámetros. Esto puede verse afectado por la presencia de nubes.

Las tablas muestran la radiación solar y la temperatura ambiente, parámetros necesarios para la caracterización de la cocina. Además se presentan gráficos de calentamiento y enfriamiento con la temperatura media, de entre las dos medidas por los termopares, en el interior de la olla.

La velocidad del viento es importante a la hora de obtener los resultados de ensayo de nuestra cocina solar. Al existir un cierto viento aumenta el coeficiente de transferencia de calor con el ambiente (U), puesto que la incidencia del viento sobre las paredes de la olla provoca un aumento de la radiación y de la transferencia de calor al ambiente. Al disponer de un anemómetro, se midió la velocidad del viento, cuando aparecía, para comprobar que ésta no superaba los 4 m/s.

El intervalo de tiempo entre el que se han tomado medidas ha sido de 10 minutos para los ensayos con carga y de 5 minutos para el ensayo en vacío. La diferencia en el intervalo considerado se debe a la mayor rapidez en la variación de las temperaturas en el ensayo en vacío respecto al ensayo con carga. Todo esto parte de la base de que para un intervalo de 10 minutos, o menor, las variaciones atmosféricas no pueden ser muy significativas respecto al instante de tiempo inmediatamente anterior siempre y cuando nos encontremos en condiciones normales. Estas condiciones se verán seriamente afectadas por otros elementos tales como nubes.

Los aparatos utilizados para realizar las mediciones se pueden observar en el Anexo 3.

11.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DÍAS DE ENSAYO

Los ensayos fueron llevados a cabo los días 29 y 30 de junio y 1 de julio de 2015. Las condiciones climatológicas en los tres días fueron muy similares. Por ello se realiza una descripción general de dichas condiciones para los tres días y a continuación se presentan las pequeñas diferencias entre estos días.

En estos días, el cielo se veía prácticamente azul debido a que la presencia de nubes era escasa tirando a nula. A continuación se presentan las fotografías del cielo realizadas dichos días.



Figura 28. Estado del cielo los días 29 de junio (izquierda), 30 de junio (centro) y 1 de julio (derecha).

Fuente propia

El viento en los días de ensayos fue bastante reducido, generalmente no se alcanzaban velocidades mayores de 1 m/s. Sin embargo, aparecen en los días 30 de junio y 1 de julio pequeñas rachas de viento de corta duración, entre 30 segundos y 1 minuto, cuyos valores alcanzaron como máximo los 2,6 m/s y 2,9 m/s, respectivamente.

En cuanto a la temperatura ambiente tal y como se ve en los datos recopilados a continuación fueron días muy calurosos. La temperatura media de los tres días rondó los 37 °C

11.2. HOJAS DE DATOS

A continuación se describe el formato de las tablas de datos y los distintos parámetros que aparecen. Dicho formato es el mismo que el usado en el Apartado 8.

Los intervalos de tiempo se han explicado anteriormente por lo que se da por aclarado.

Las tablas y unidades de medida usadas, según el ensayo, son las siguientes:

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación	T1	T2	Tamb1	Tamb2
[Hora:minuto]	[Hora:minuto]	[W/m ²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1	T2	Tamb1	Tamb2
[Hora:minuto]	[Hora:minuto]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]

La radiación medida es la radiación global instantánea en un plano normal a los rayos solares. Esta radiación es de la que hace uso nuestra cocina, por lo que no hay que cambiarla de plano. En los ensayos de enfriamiento, este parámetro no es necesario y por ello no aparece en las tablas.

La temperatura de la cocina medida en el interior con distintos termopares, corresponde a T1 y T2.

La temperatura ambiente medida, a la sombra a ambos lados de la cocina, corresponde a Tamb1 y Tamb2.

Se presentan los gráficos de calentamiento y enfriamiento haciendo uso de la media de las temperaturas del interior de la cocina, T1 y T2.

La cantidad de agua usada en los ensayos se define en el Apartado 12.1.

A continuación se muestran los datos en las tablas de los ensayos realizados.

11.2.1. Tabla día 29 de junio de 2015 (AGUA)

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación [W/m ²]	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
12:00	9:42	994	30,4		36,5	
12:10	9:52	993	40,7		38,1	
12:20	10:02	1.007	52		37,2	
12:30	10:12	1.009	58,9		38	
12:40	10:22	1.000	64,8		37,9	
12:50	10:32	996	71,9		38,2	
13:00	10:42	1.000	76,9		37,9	
13:10	10:52	1.004	79,9		37,8	
13:20	11:02	1.012	82,1		38,7	
13:30	11:12	1.025	83		38,3	
13:40	11:22	1.030	85,7		38,2	
13:50	11:32	1.022	87		37,7	
14:00	11:42	992	87,9		36,6	
14:10	11:52	1.002	88,6		37,1	
14:20	12:02	980	89,5		36,7	
14:30	12:12	972	89,9		37,6	
14:40	12:22	965	90,5		36,9	

Nota: Debido a problemas de medida con los termómetros y termopares, no fue posible tomar las dos medidas ni en el interior de la olla ni de la temperatura ambiente. Por ello, sólo aparece una columna de temperaturas de cada tipo.

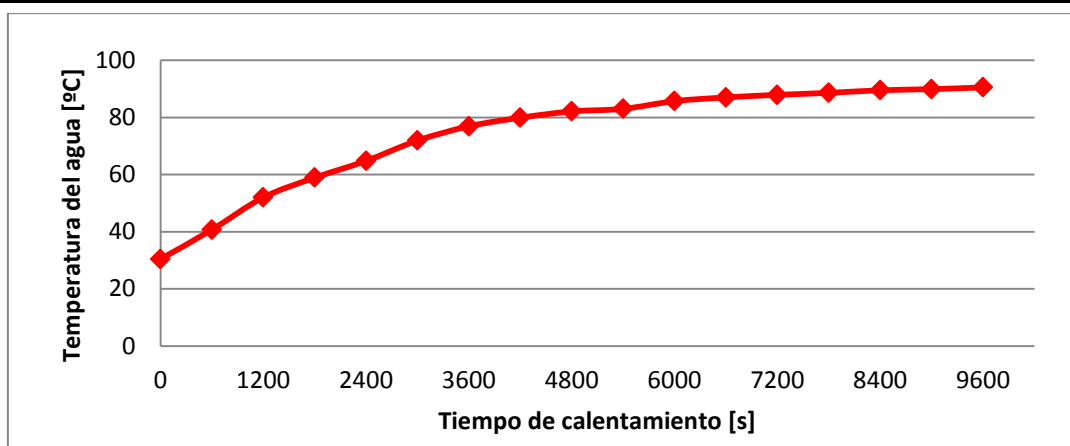


Gráfico 28. Perfil de calentamiento 29/06/2015 (AGUA).

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
14:50	12:32	85,6		37,2	
15:00	12:42	79,2		35,9	
15:10	12:52	73,9		36,1	
15:20	13:02	69,8		35,9	
15:30	13:12	68,5		37,2	
15:40	13:22	62		37,1	
15:50	13:32	58,8		37,1	
16:00	13:42	56,1		37	

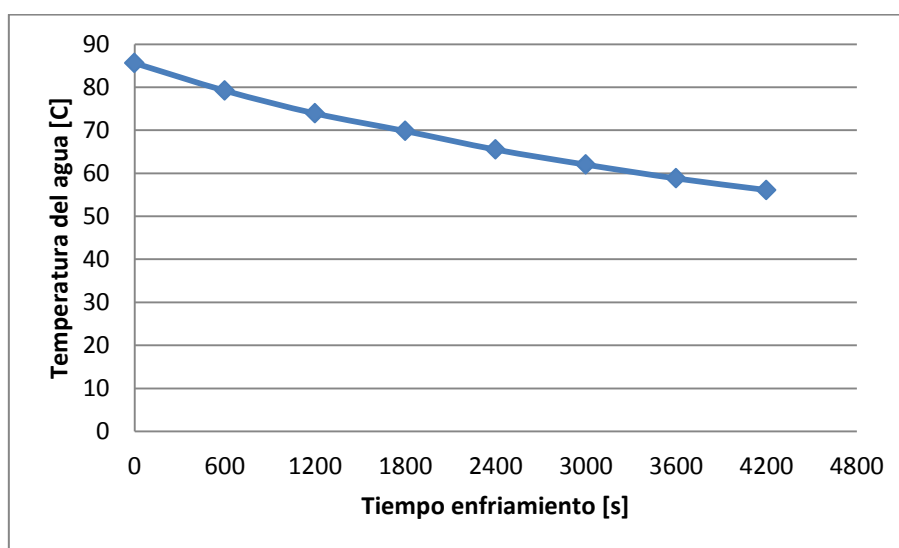


Gráfico 29. Perfil de enfriamiento 29/06/2015 (AGUA).

11.2.2. Tabla día 30 de junio de 2015 (VACÍO)

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación [W/m ²]	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
12:02	9:43	1.011	63,2	62,6	36,1	35,6
12:07	9:48	1.014	84,7	85,1	37	38
12:12	9:53	1.011	97,2	97,1	35,4	38,8
12:17	9:58	1.021	104,1	104,3	36,1	38,4
12:22	10:03	1.023	111,8	112	37,3	39,4
12:27	10:08	1.020	114,2	115,3	35,7	37
12:32	10:13	1.026	117,4	117,8	37,7	40
12:37	10:18	1.015	121	121,5	34,1	38
12:42	10:23	1.029	122,1	122,2	37	41
12:47	10:28	1.029	122,2	122,4	35	40,2
12:52	10:33	1.031	121,8	122	38	40,1
12:57	10:38	1.030	122	122,7	36,9	38,3

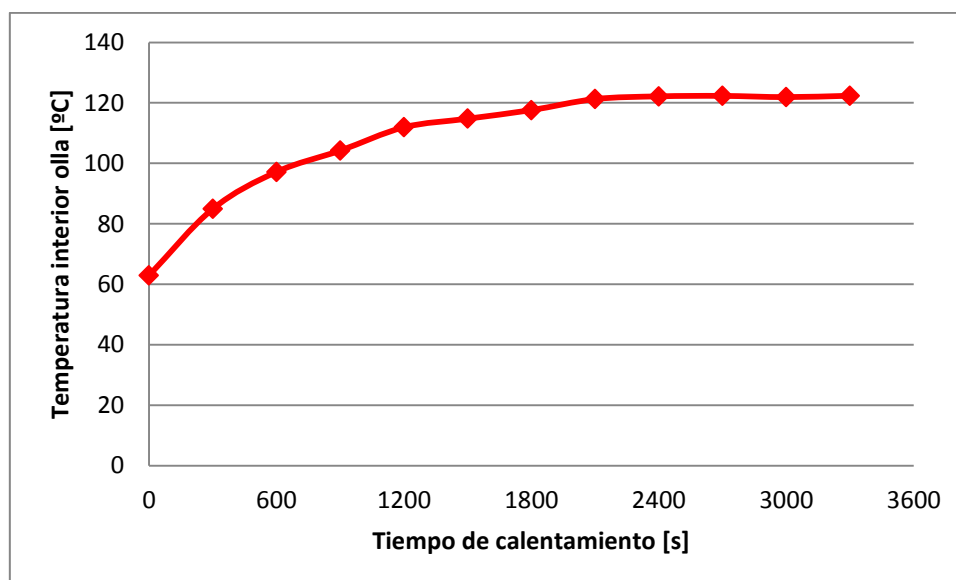


Gráfico 30. Perfil de calentamiento 30/06/2015 (VACÍO).

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
12:57	10:38	122	122,7	36,9	38,3
13:02	10:43	88,7	88,5	33,5	37,2
13:07	10:48	74	74,1	32,7	34,2
13:12	10:53	63,9	63,3	33,7	33,9
13:17	10:58	59,3	59	33,3	33,6
13:22	11:03	54,5	54,2	33,6	33,4
13:27	11:08	50,3	50,5	34,1	34
13:32	11:13	47,7	48	33,7	33,8

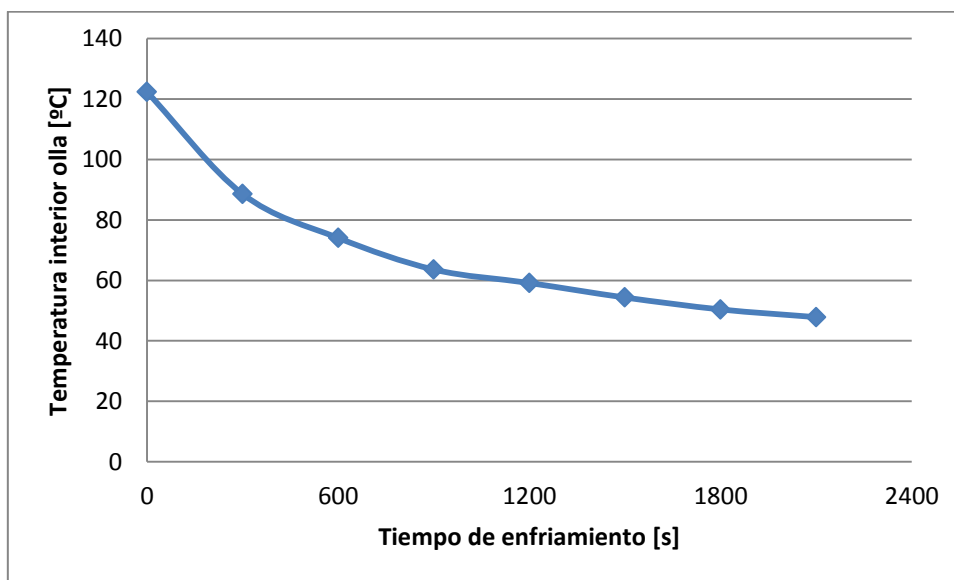


Gráfico 31. Perfil de enfriamiento 30/06/2015 (VACÍO).

11.2.3. Tabla día 1 de julio de 2015 (AGUA)

- CALENTAMIENTO

Hora local	Hora solar	Radiación [W/m ²]	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
12:03	9:44	1.027	30	31	31,9	32
12:13	9:54	1.027	40,6	40,6	35	32,5
12:23	10:04	1.035	51,3	51,1	33,3	34,3
12:33	10:14	1.035	60,9	60,7	35	33,6
12:43	10:24	1.050	68,6	68,4	35,2	34,5
12:53	10:34	1.055	74,2	74,1	35,3	34,6
13:03	10:44	1.056	79	78,7	36,6	35,2
13:13	10:54	1.056	81,3	81,1	36,2	36,5
13:23	11:04	1.050	81,8	81,7	35,2	34,1
13:33	11:14	1.030	84	83,4	38,5	38,2
13:43	11:24	1.040	86,5	85,8	36,8	38,5
13:53	11:34	1.037	87,6	86,5	36	36,8
14:03	11:44	1.018	87,9	87,1	37,1	39,2

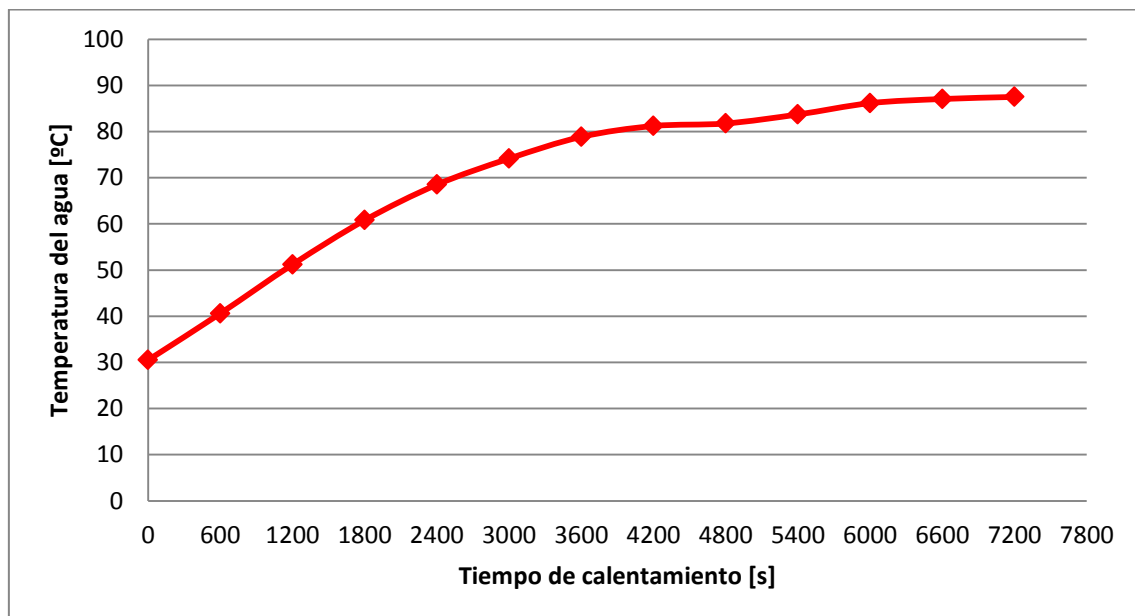


Gráfico 32. Perfil de calentamiento 01/07/2015 (AGUA).

- ENFRIAMIENTO

Hora local	Hora solar	T1 [°C]	T2 [°C]	Tamb1 [°C]	Tamb2 [°C]
14:13	11:54	81,4	81,4	34,3	34,2
14:23	12:04	74,6	74,5	34,3	34,4
14:33	12:14	70	69,8	34,7	34,9
14:43	12:24	65,5	65,4	34,1	33,9
14:53	12:34	62,1	62	34,1	34,4
15:03	12:44	58,7	58,7	34,2	33,9
15:13	12:54	56,2	56,1	33,7	34
15:23	13:04	54	54	33,7	33,9

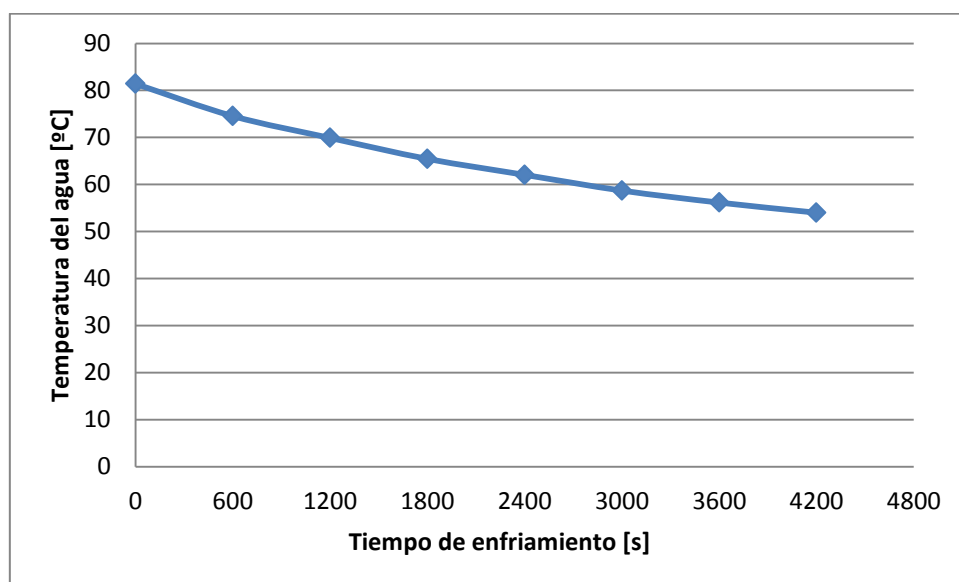


Gráfico 33. Perfil de enfriamiento 01/07/2015 (AGUA).

Como puede observarse en todos los gráficos de enfriamiento, el comportamiento es prácticamente exponencial. Para que dicho comportamiento fuera totalmente exponencial, el valor de t_0 debería ser constante en cada ensayo.

12. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VERANO

Los resultados se han obtenido a partir de los datos mostrados anteriormente y se hallan en función de las distintas normativas. Así se calculará la **potencia útil** (Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos), las **figuras de mérito** (Oficina de Normas de la India) y el **rendimiento óptico** (Modelo Cero-dimensional).

Los datos se presentan en tablas. En éstas aparece la radiación media en el intervalo de medida, calculada como la media entre la radiación al comienzo y el final del intervalo. También la temperatura ambiente media del intervalo, resultado de la media entre las mediciones obtenidas en los dos termopares exteriores al principio y final del intervalo. Además aparece la temperatura media en el interior de la olla, resultado del promedio de las medidas obtenidas por los termopares ubicados en el interior.

Los resultados obtenidos en cada uno de los apartados, nos da unos parámetros objetivos y experimentales con los que se completa la caracterización de la cocina. Además estos parámetros sirven para realizar comparaciones con otras cocinas solares.

Los datos y resultados presentados, no son extrapolables a otras cocinas solares.

12.1. CÁLCULO DE LAS CAPACIDADES TÉRMICAS

El modelo usado para el cálculo de las capacidades térmicas es el mismo que se ha usado en la caracterización realizada en los días de otoño. Las únicas variaciones que se presentan en estos ensayos son debidas a la distinta masa de agua al inicio y al fin de los ensayos respecto a los anteriores. Por ello, se procede a detallar las masas iniciales y finales de agua en los ensayos de verano y el cálculo las capacidades térmicas afectadas por estas variaciones. El resto de parámetros como las masas de la olla y el cobertor y la capacidad térmica de la olla en vacío, C_{vp} , para el cálculo de la potencia útil sin carga, permanecen constantes y se pueden consultar en el Apartado 9.1.

- Agua:
En los ensayos en los que se usa agua, se hizo una medición de la masa antes de empezar y otra tras la experimentación. En ambos, se obtuvo 1,5 kg de agua al comienzo y 1,3 kg al final. Esta diferencia se debe al agua perdida en forma de vapor debido a la no estanqueidad de cierre de la olla provocada por los cables de los termopares usados para el seguimiento de la temperatura del fluido. El calor específico considerado ha sido 4,19 [kJ/kg·K].

Si asumimos una duración del ensayo medio de 2,2 horas y distribuimos triangularmente esta potencia a lo largo del tiempo, pues al calentar se evapora más deprisa, se tiene:

$$\frac{1}{2} \cdot 2,2 \cdot 3.600 \text{ s} \cdot Q_{evap,max} = 0,2 \text{ kg} \cdot 2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow Q_{evap,max} = 114 \text{ W} \text{ (Ec. 1)}$$

Es bastante grande y comparable en magnitud a las pérdidas convectivas. Su valor medio es 57 W. Coincide $Q_{evap,max}$ con la potencia máxima en cantidad, luego capaz de sumarse a las pérdidas por convección y hacer decrecer la potencia útil a altas sobre-temperaturas tanto que la anula. Ello puede justificar la desviación observada anteriormente en el modelo predictivo, Gráfico 27.

12.1.1. Potencia útil

En la norma en la que se considera el cálculo de la potencia útil (ASAE S580) no aparecen referencias a pérdidas de masa. Por ello, para el cálculo de dicha potencia se considera la masa de agua al inicio del ensayo. Esto se debe a que así se facilita la comparación de potencias con otros ensayos conociendo la masa inicial. Si se considerase la masa final, para poder hacer una comparación habría que repetir los ensayos hasta que las masas finales coincidiesen.

A continuación se calcula la capacidad térmica del agua, que es la necesaria para determinar la potencia útil según la norma. La capacidad térmica de la cocina en vacío está ya calculada como se ha indicado anteriormente.

- Agua:

$$C_{lp} = m_{agua} \cdot c_{agua}$$

$$C_{lp} = 1,5 \cdot 4.190$$

$$C_{lp} = 6.258 \left[\frac{J}{K} \right]$$

12.1.2. Resto de parámetros

Conocida la capacidad térmica usada en la potencia útil, se pasa a calcular las capacidades térmicas que se usan en el resto de parámetros como F_2 , AUF' o la eficiencia óptica η_0 .

En estos parámetros, el cálculo de la capacidad térmica se puede hacer sólo considerando la carga de la olla, es decir, la masa de agua o considerando además de esto, la masa de la olla y la aportación del cobertor.

Para estos parámetros, que se obtienen de balances energéticos, hay que considerar la evolución de la masa de agua. Debido a que no se ha instalado una célula de carga que hubiera permitido conocer la evolución instantánea de la masa de agua, se considerará como masa de agua para los cálculos la media entre la masa inicial y la masa final. Atendiendo a los valores dados de masa inicial y final de agua, la masa media de agua durante el ensayo fue 1,4 kg. A continuación se procede al cálculo de las capacidades térmicas.

- Agua:

$$C_l = m_{agua} \cdot c_{agua}$$

$$C_l = 1,4 \cdot 4.190$$

$$C_l = 5.866 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$$

- Olla cargada de agua:

$$C = m_{agua} \cdot c_{agua} + m_{olla} \cdot c_{olla} + 0,5 \cdot (m_{cobertor} \cdot c_{cobertor})$$

$$C = 1,4 \cdot 4.190 + 0,6 \cdot 420 + 0,5 \cdot 2,7 \cdot 720$$

$$C = 7.090 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$$

12.2. SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)

La potencia de calentamiento no va a ser constante, puesto que tiende a disminuir según se acerca a la temperatura de estancamiento o de ebullición del líquido que se encuentra en el recipiente (la primera en llegar), siendo su valor cero cuando se alcanza dicho punto debido al efecto de las pérdidas de calor.

Debido a lo anterior, podremos hallar la **potencia útil normalizada** máxima de la cocina, $P_{s,máxima}$, que se obtiene cuando la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura interior sea cero. Así mismo, la norma indica que el valor de la potencia útil normalizada característica de la cocina se obtiene cuando la sobre-temperatura sea de 50 °C, $P_{s,50°C}$. **Al ser útil, se considera solamente la capacidad calorífica del agua sin considerar evaporación C_{lp} .**

Además, se presentan gráficos que relacionan la potencia normalizada con la sobre-temperatura para cada ensayo, y la correlación lineal obtenida de éstos.

12.2.1. Día 29 de junio (AGUA)

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	Potencia útil normalizada [W]	Sobre-temperatura [°C]
12:00	30,4	994		-6,1
12:10	40,7	993,5	76,0	2,6
12:20	52	1.000	82,9	14,8
12:30	58,9	1.008	50,2	20,9
12:40	64,8	1.004,5	43,1	26,9
12:50	71,9	998	52,2	33,7
13:00	76,9	998	36,7	39
13:10	79,9	1002	21,9	42,1
13:20	82,1	1008	16,0	43,4
13:30	83	1.018,5	6,5	44,7
13:40	85,7	1.027,5	19,3	47,5
13:50	87	1.026	9,3	49,3
14:00	87,9	1.007	6,6	51,3
14:10	88,6	997	5,1	51,5
14:20	89,5	991	6,7	52,8
14:30	89,9	976	3,0	52,3
14:40	90,5	968,5	4,5	53,6

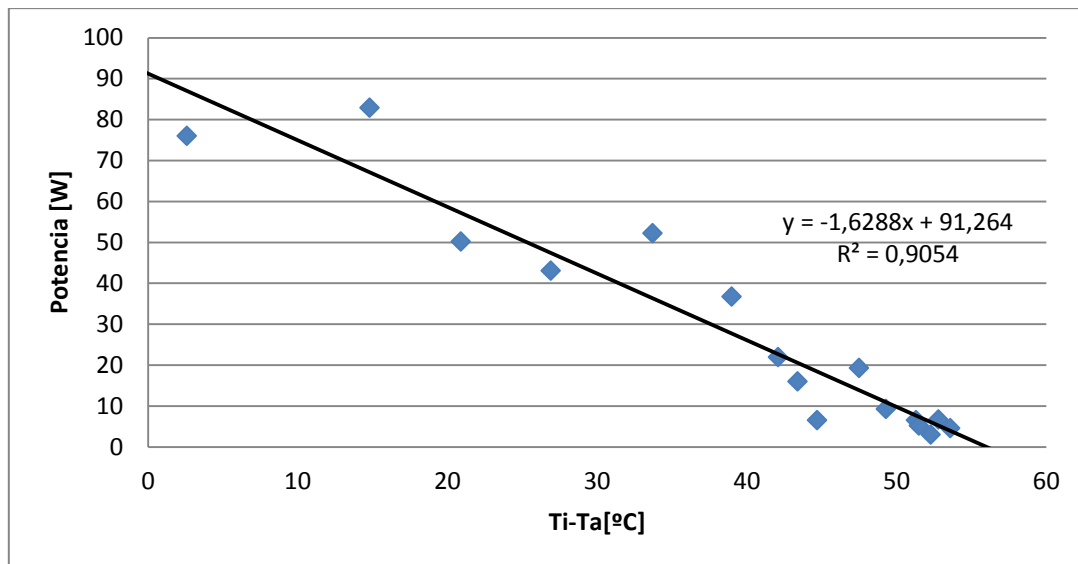


Gráfico 34. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 29/06/2015 (AGUA).

De la correlación lineal obtenida, podemos calcular:

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 91,3 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}C} = 9,8 \text{ W}$$

Se corrobora un crecimiento de las pérdidas de calor, con el consiguiente descenso de la potencia útil al aumentar la sobre-temperatura.

12.2.2. Día 30 de junio (VACÍO)

Aunque la ASAE S580 indica que los ensayos deben hacerse con agua, aquí se considera también el ensayo en vacío con un fin comparativo.

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	Potencia útil normalizada [W]	Sobre-temperatura [°C]
12:02	62,9	1.011		27,1
12:07	84,9	1.012,5	62,1	47,4
12:12	97,15	1.012,5	34,6	60,1
12:17	104,2	1.016	19,8	66,9
12:22	111,9	1.022	21,5	73,6
12:27	114,75	1.021,5	7,9	78,4

12:32	117,6	1.023	7,9	78,8
12:37	121,25	1.020,5	10,2	85,2
12:42	122,15	1.022	2,5	83,2
12:47	122,3	1.029	0,4	84,7
12:52	121,9	1.030	-1,1	82,9
12:57	122,35	1030,5	1,2	84,8

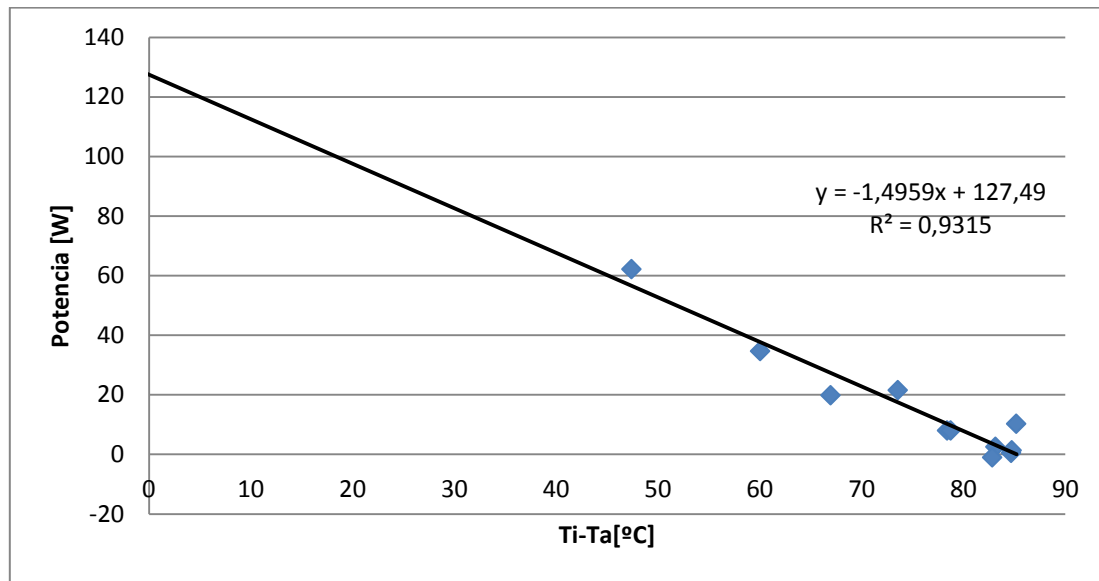


Gráfico 35. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 30/06/2015 (VACÍO).

De la correlación lineal obtenida, podemos calcular:

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 127,5 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}C} = 52,7 \text{ W}$$

12.2.3. Día 1 de julio (AGUA)

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	Potencia útil normalizada [W]	Sobre-temperatura [°C]
12:03	30,5	1.027		-1,5
12:13	40,6	1.027	72,1	6,9
12:23	51,2	1.031	75,4	17,4

12:33	60,8	1.035	68,0	26,5
12:43	68,5	1.042,5	54,2	33,7
12:53	74,15	1.052,5	39,4	39,2
13:03	78,85	1.055,5	32,7	42,9
13:13	81,2	1.056	16,3	44,9
13:23	81,75	1.053	3,8	47,1
13:33	83,7	1.040	13,7	45,4
13:43	86,15	1.035	17,4	48,5
13:53	87,05	1.038,5	6,4	50,7
14:03	87,5	1.027,5	3,2	49,4

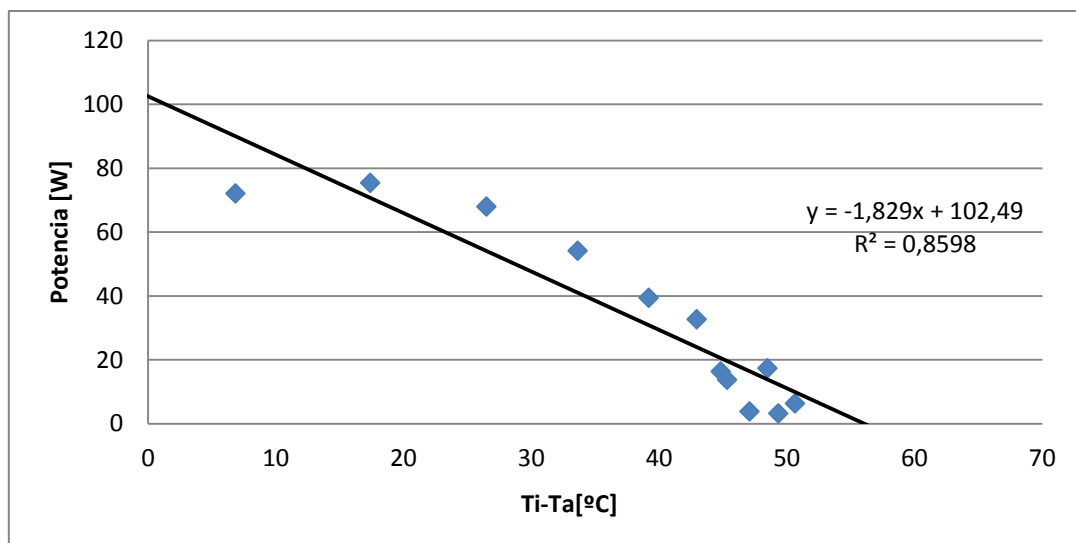


Gráfico 36. Potencia normalizada frente a sobre-temperatura 01/07/2014 (AGUA).

De la correlación lineal obtenida, podemos calcular:

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 102,5 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}C} = 11,0 \text{ W}$$

12.2.4. Comparación de los tres ensayos

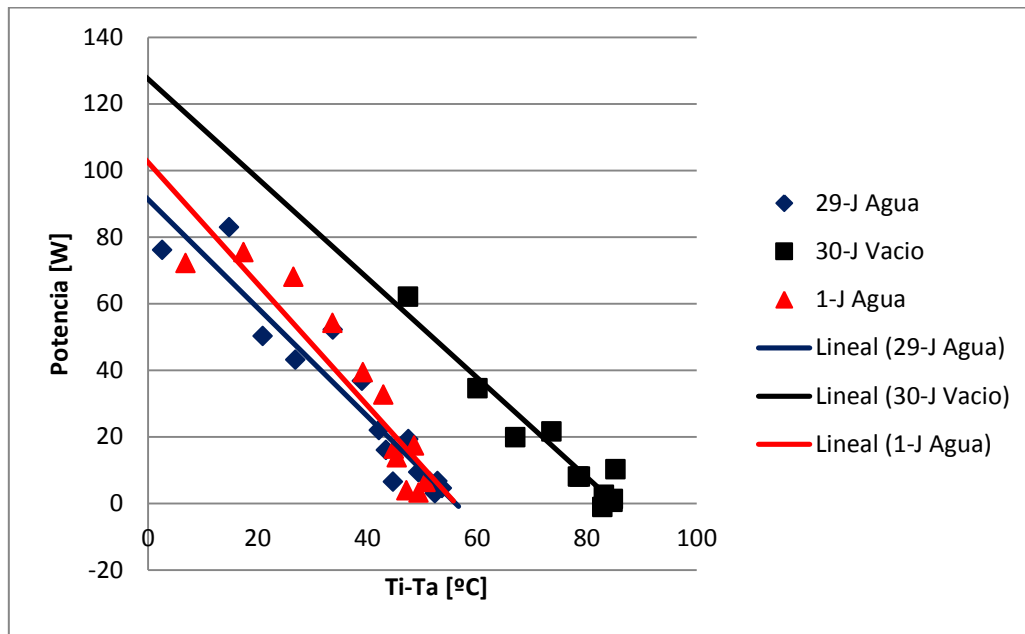


Gráfico 37. Comparación de la potencia normalizada frente a sobre-temperatura para los ensayos de verano.

Como se puede observar en el gráfico, la potencia obtenida en ambos ensayos con la olla cargada es similar. En cuanto a la potencia de la olla en vacío, se observa que es mayor a la potencia con la olla cargada. Las diferencias en estas potencias se pueden deber a lo siguiente:

- Las pérdidas que presenta la cocina son similares con la olla cargada y con la olla en vacío a excepción de las pérdidas por evaporación y condensación en la tapa que sólo se presentan en los ensayos con agua. Según estos resultados, es aproximadamente constante e igual a unos 50 W, valor que coincide con la media del valor calculado en la Ecuación 1, apoyándose con ello la tesis de que la evaporación es la causa principal de la diferencia. Ésta puede ser una de las causas de las diferencias observables entre las potencias de los distintos tipos de ensayos.
- Al aumentar la sobre-temperatura, se observa un ligero aumento de las diferencias entre las potencias de los distintos tipos de ensayos. Esto se debe, en parte, al aumento de la cantidad de agua que se evapora en la olla al tener mayor temperatura. Esta agua evaporada, bien se escapa al exterior o bien se condensa en la tapa, lo que en cualquier caso, provoca una pérdida del calor aprovechable por la cocina para aumentar la temperatura del agua.

12.3. OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA

En este apartado se calculan las dos figuras de mérito que indica esta norma. La primera de ellas, F_1 , se calcula en el ensayo en vacío, por lo que se ha explicado en el Apartado 5.2 correspondiente a esta norma. La segunda figura de mérito, F_2 , se calcula en los ensayos con la olla cargada.

Para el cálculo de estas figuras de mérito es necesario conocer la relación entre el área de colección de la olla y el área de apertura. En el Apartado 7 se calculó el área de colección de la olla y se presentó una tabla con los valores del área de apertura en función de la altura solar. Sabiendo que en estos ensayos de verano, la media de la altura solar durante los ensayos ha sido 65° , quedan determinadas ambas áreas cuyos valores se presentan a continuación:

$$A = 0,139 \text{ m}^2$$

$$A_a = 0,389 \text{ m}^2$$

Las ecuaciones que representan las figuras de mérito vienen dadas en el Apartado 5.2.

12.3.1. Figura de mérito 1

- Día 30 de junio (VACÍO)

Atendiendo a las temperaturas medidas en el interior de la olla en vacío, se hace una estimación de la temperatura de estancamiento T_{st} . Así, vemos que los datos de los que disponemos son los siguientes:

Hora real	Radiación [W/m^2]	T media [$^\circ\text{C}$]
12:42	1.029	122,2
12:47	1.029	122,3
12:52	1.031	121,9
12:57	1.030	122,3

Con esto, estimamos la temperatura de estancamiento haciendo la media de los valores anteriores:

$$T_{st} = 122,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los valores de temperatura ambiente y radiación usados para este cálculo, son la media de los valores registrados durante todo el ensayo. Así tenemos:

$$T_a = 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$G = 1.022 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Sustituyendo en F_1 :

$$F_1 = \frac{0,139}{0,389} \cdot \frac{122,2 - 37,5}{1022}$$

$$F_1 = 0,029 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

12.3.2. Figura de mérito 2

En ambos apartados se presentan los datos de temperatura ambiente media en cada intervalo, así como la radiación media de cada intervalo.

12.3.2.1. Día 29 de junio

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T _{ambiente} media intervalo [°C]	F_2
12:00	30,4	994	36,5	
12:10	40,7	993,5	37,3	0,256
12:20	52	1.000	37,7	0,318
12:30	58,9	1.008	37,6	0,219
12:40	64,8	1.004,5	37,9	0,208
12:50	71,9	998	38,1	0,283
13:00	76,9	998	38,1	0,225
13:10	79,9	1.002	37,9	0,147
13:20	82,1	1.008	38,3	0,113
13:30	83	1.018,5	38,5	0,047
13:40	85,7	1.027,5	38,3	0,144
13:50	87	1.026	37,9	0,074
14:00	87,9	1.007	37,2	0,057
14:10	88,6	997	36,9	0,047
14:20	89,5	991	36,9	0,063

14:30	89,9	976	37,2	0,029
14:40	90,5	968,5	37,3	0,046

Para temperaturas cercanas a las de estancamiento con la olla cargada, los aumentos de temperatura son, generalmente, menores a 1 °C. Esto provoca un valor de F_2 bastante pequeño que no se corresponde con el funcionamiento normal de la cocina. Por ello, a partir de las mediciones de las 14:00 h, no se considerarán los valores para el cálculo de este parámetro. A partir de lo anterior, podemos estimar el valor de F_2 como la media de los valores considerados válidos (no tachados).

$$F_2 = 0,185$$

Sin embargo, a bajas sobre-temperaturas, para las que el efecto de la evaporación es menor, se tiene un valor medio aproximadamente $F_2 = 0,25$, más próximo al valor obtenido en octubre, véase el Apartado 9.5.

12.3.2.2. Día 1 de julio

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T _{ambiente} media intervalo [°C]	F_2
12:03	30,5	1.027	31,9	
12:13	40,6	1.027	32,9	0,260
12:23	51,2	1.031	33,8	0,307
12:33	60,8	1.035	34,1	0,319
12:43	68,5	1.042,5	34,6	0,291
12:53	74,2	1.052,5	34,9	0,236
13:03	78,9	1.055,5	35,4	0,215
13:13	81,2	1.056	36,1	0,114
13:23	81,8	1.053	35,5	0,028
13:33	83,7	1.040	36,5	0,104
13:43	86,2	1.035	38	0,134
13:53	87,1	1.038,5	37,0	0,052
14:03	87,5	1.027,5	37,3	0,027

A partir de lo anterior, podemos estimar el valor de F_2 como la media de los anteriores, pero sin considerar los dos últimos resultados (tachados) por las razones dadas anteriormente.

$$F_2 = 0,201$$

12.4. DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL

En el desarrollo de este modelo se siguen los pasos especificados en el Apartado 5.4 correspondiente a la norma.

El primer paso es la obtención de la curva de enfriamiento a partir de los datos obtenidos en las mediciones. Sólo se tienen en cuenta las mediciones realizadas con la olla cargada. Con esta curva, obtenemos el tiempo de enfriamiento característico.

En el apartado de la norma se presentaban dos maneras de calcular el tiempo característico, primer orden y segundo orden centrado. En este apartado se calcula la de segundo orden centrado, ya que rechaza mejor el ruido y es más exacto.

12.4.1. Cálculo del tiempo característico t_0

12.4.1.1. Día 29 de junio (AGUA)

Hora real	T media [°C]	T _{ambiente} media [°C]	t_0 [s]
14:50	85,6	37,2	
15:00	79,2	35,9	4.389
15:10	73,9	36,1	4.802
15:20	69,8	35,9	4.691
15:30	65,5	37,2	4.467
15:40	62	37,1	4.534
15:50	58,8	37,1	4.522
16:00	56,1	37	

A partir de estos valores, se puede dar un valor característico para el tiempo de enfriamiento. Haciendo la media, obtenemos un valor de:

$$t_0 = 4.568 \text{ s} \approx 1,27 \text{ h}$$

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento de t_0 en función del tiempo transcurrido de enfriamiento.

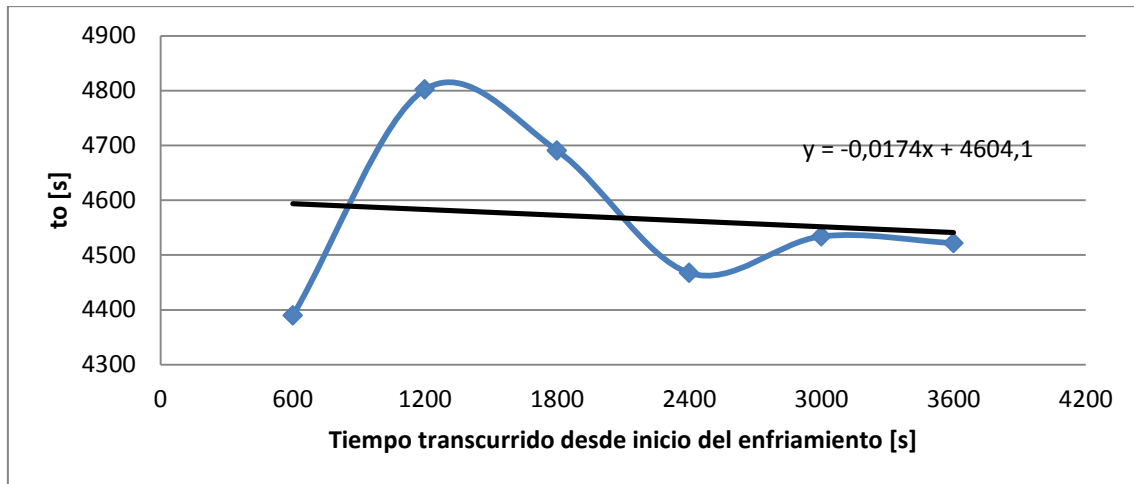


Gráfico 38. Evolución de t_0 con el tiempo 29/06/2015 (AGUA).

Como se puede comprobar según la línea de tendencia, el valor de t_0 disminuye al aumentar el tiempo de enfriamiento. Este comportamiento no es acorde a la física debido a que la diferencia de temperaturas entre el interior de la olla y la temperatura ambiente va disminuyendo, lo que hace disminuir el valor de U , fundamentalmente debido a convección natural y debería hacer aumentar el valor de t_0 . Que la línea de tendencia sea decreciente puede deberse a los valores del segundo y tercer intervalo, mayores que los de los otros intervalos y que provoca un decrecimiento con los siguientes valores. Además, puede observarse en la ecuación de la línea de tendencia, que la pendiente es muy pequeña, prácticamente nula y la dispersión de los datos es muy alta, por lo que el descenso no es estadísticamente muy sólido.

12.4.1.2. Día 1 de julio (AGUA)

Hora real	T media [°C]	T _{ambiente} media [°C]	t_0 [s]
14:13	81,4	34,3	
14:23	74,6	34,4	4.301
14:33	69,9	34,8	4.699
14:43	65,5	34	4.837
14:53	62,1	34,3	4.937
15:03	58,7	34,1	5.047
15:13	56,2	33,9	5.642
15:23	54	33,8	

A partir de estos valores, se puede dar un valor característico para el tiempo de enfriamiento. Haciendo la media, obtenemos un valor de:

$$t_0 = 4911 \text{ s} \approx 1,36 \text{ h}$$

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento de t_0 en función del tiempo transcurrido de enfriamiento.

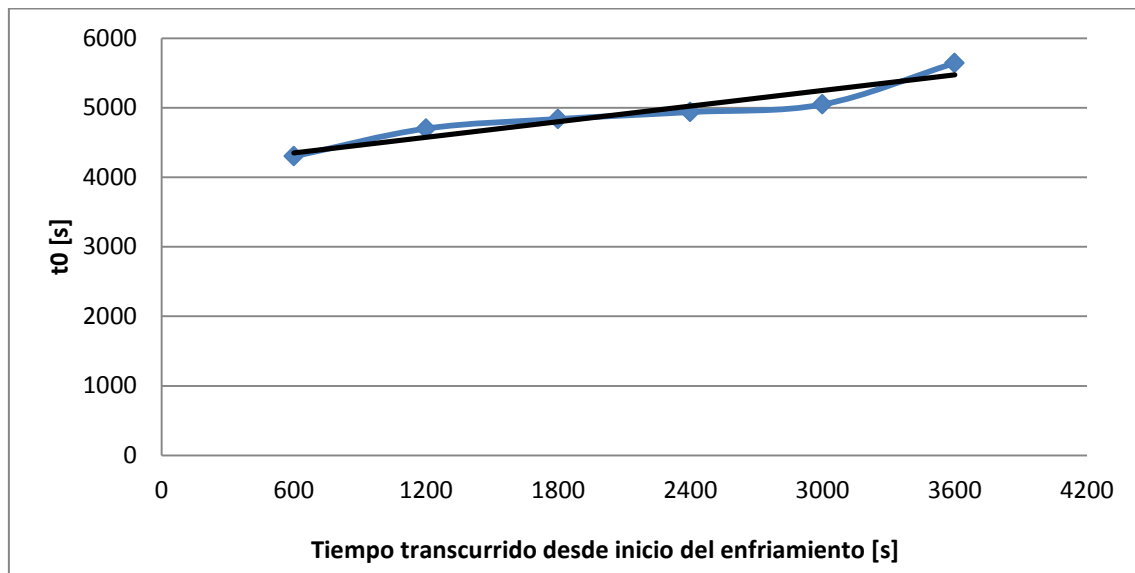


Gráfico 39. Evolución de t_0 con el tiempo 1/07/2015 (AGUA).

Como se puede comprobar, el comportamiento es el esperado anteriormente. Se comprueba que t_0 aumenta con el tiempo, lo que va acorde a la física.

12.4.2. Cálculo del coeficiente de pérdidas AUF'

Conocido el valor de t_0 , se puede entrar en su propia ecuación con la finalidad de obtener el coeficiente de pérdidas AUF' . Para ello, se hace uso de la capacidad térmica efectiva total hallada en el Apartado 9.1.

$$C = 7.090 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$$

12.4.2.1. Día 29 de junio

Hora real	T media [°C]	T_{ambiente} media [°C]	t_o [s]	AUF' [W/K]
14:50	85,6	37,2		
15:00	79,2	35,9	4.389	1,62
15:10	73,9	36,1	4.802	1,48
15:20	69,8	35,9	4.691	1,51
15:30	65,5	37,2	4.467	1,59
15:40	62	37,1	4.534	1,56
15:50	58,8	37,1	4.522	1,57
16:00	56,1	37		

A partir de estos resultados, se puede dar un valor medio a AUF' durante este ensayo, que es la media de los valores presentados:

$$AUF' = 1,55 \left[\frac{W}{K} \right]$$

A continuación se presenta un gráfico del comportamiento de AUF' en función del tiempo de enfriamiento.

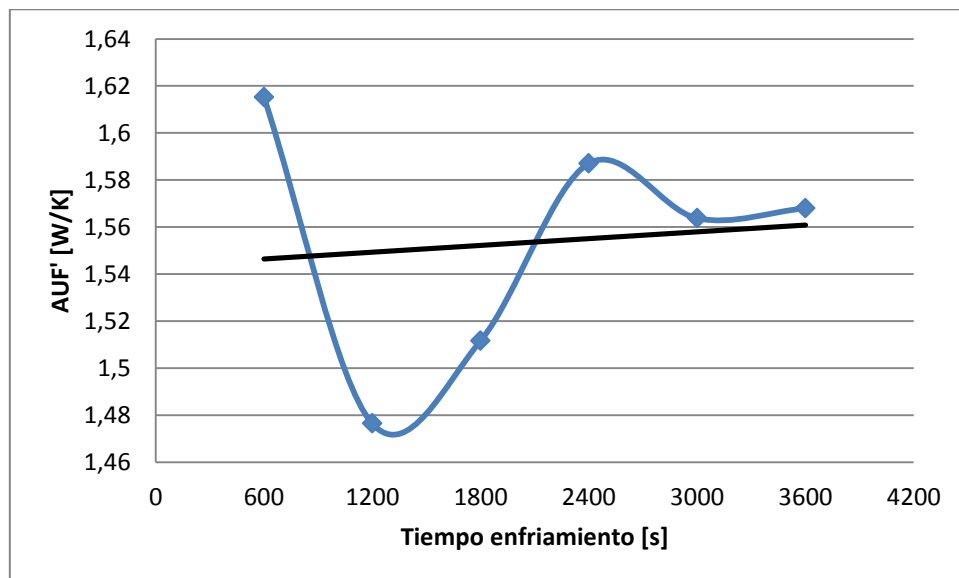


Gráfico 40. Evolución de AUF' con el tiempo 29/06/2015 (AGUA).

Puede observarse una evolución en contradicción con la física. El comportamiento debería ser descendiente con el tiempo, pues descende la diferencia de temperatura y la

evaporación. Esta contradicción se debe a que es un parámetro calculado a partir de t_0 , que conserva su comportamiento de forma inversa.

12.4.2.2. Día 1 de julio

Hora real	T media [°C]	T _{ambiente} media [°C]	t_0 [s]	AUF' [W/K]
14:13	81,4	34,3		
14:23	74,6	34,4	4.301	1,67
14:33	69,9	34,8	4.699	1,53
14:43	65,5	34	4.837	1,49
14:53	62,1	34,3	4.937	1,46
15:03	58,7	34,1	5.047	1,43
15:13	56,2	33,9	5.642	1,28
15:23	54	33,8		

A partir de estos resultados, se puede dar un valor medio a AUF' durante este ensayo, que es la media de los valores presentados:

$$AUF' = 1,48 \left[\frac{W}{K} \right]$$

A continuación se presenta un gráfico del comportamiento de AUF' en función del tiempo de enfriamiento.

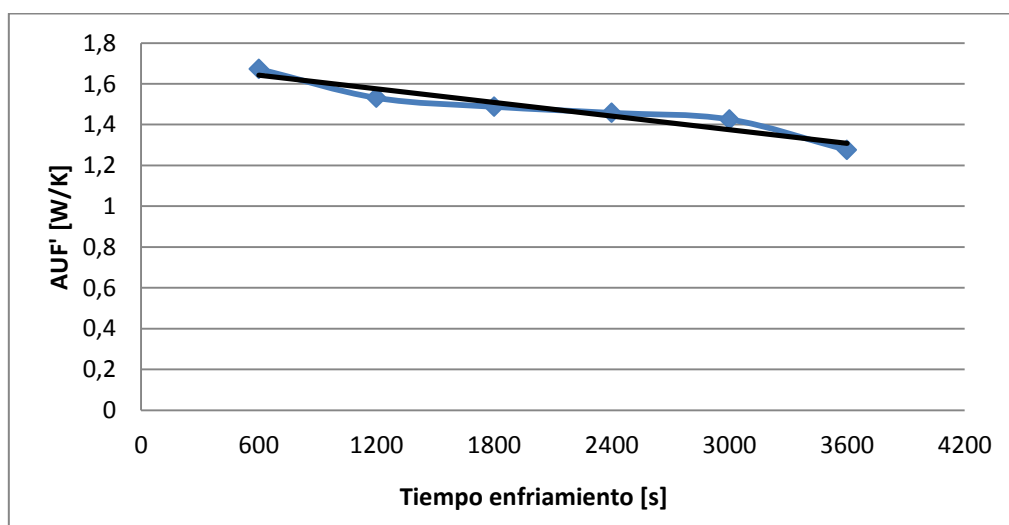


Gráfico 41. Evolución de AUF' con el tiempo 1/07/2015 (AGUA).

En este gráfico, la tendencia de la variable AUF' es la esperada. Esta tendencia se debe únicamente a la variable U , ya que tanto A como F' se comportan de forma constante. La variable U hace referencia al coeficiente global de transferencia de calor. La disminución de U con el tiempo de enfriamiento se explica por el mismo motivo que el aumento del tiempo de enfriamiento. Con el transcurrir del tiempo, el gradiente de temperaturas olla-ambiente va disminuyendo. Esto provoca un menor intercambio de energía en forma de calor entre la olla y los alrededores, dando como resultado la disminución de U y el aumento de t_0 .

12.4.3. Cálculo de la eficiencia óptica η_0

Esta eficiencia, se determina con los ensayos hechos con la olla cargada de agua. La ecuación a partir de la cual se obtienen los valores de la eficiencia óptica aparece en el Apartado 5.4 correspondiente al modelo cero-dimensional. Podemos observar que disponemos de todas las variables que aparecen. Tanto A_a como C son las halladas anteriormente. El valor de t_0 usado es el valor medio de cada ensayo, dado anteriormente.

12.4.3.1. Día 29 de junio

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T_{ambiente} media intervalo [°C]	Eficiencia óptica η_0
12:00	30,4	994	36,5	
12:10	40,7	993,5	37,3	0,309
12:20	52	1.000	37,7	0,379
12:30	58,9	1.008	37,6	0,279
12:40	64,8	1.004,5	37,9	0,274
12:50	71,9	998	38,1	0,338
13:00	76,9	998	38,1	0,298
13:10	79,9	1.002	37,9	0,253
13:20	82,1	1.008	38,3	0,236
13:30	83	1.018,5	38,5	0,199
13:40	85,7	1.027,5	38,3	0,259
13:50	87	1.026	37,9	0,227
14:00	87,9	1.007	37,2	0,227
14:10	88,6	997	36,9	0,227
14:20	89,5	991	36,9	0,238
14:30	89,9	976	37,2	0,228
14:40	90,5	968,5	37,3	0,237

Haciendo la media de los valores de eficiencia óptica a lo largo de todo el ensayo, obtenemos el valor característico de eficiencia óptica.

$$\eta_0 = 0,263$$

12.4.3.2. Día 1 de julio

Hora real	T media [°C]	Radiación media intervalo [W/m ²]	T_{ambiente} media intervalo [°C]	Eficiencia óptica η_0
12:03	30,5	1.027	31,9	
12:13	40,6	1.027	32,9	0,314
12:23	51,2	1.031	33,8	0,362
12:33	60,8	1.035	34,1	0,367
12:43	68,5	1.042,5	34,6	0,337
12:53	74,2	1.052,5	34,9	0,296
13:03	78,9	1.055,5	35,4	0,284
13:13	81,2	1.056	36,1	0,226
13:23	81,7	1.053	35,5	0,181
13:33	83,7	1.040	36,5	0,226
13:43	86,2	1.035	38	0,244
13:53	87,1	1.038,5	37,0	0,207
14:03	87,5	1.027,5	37,3	0,197

Haciendo la media de los valores de eficiencia óptica a lo largo de todo el ensayo, obtenemos el valor característico de eficiencia óptica.

$$\eta_0 = 0,269$$

Puede observarse una consistencia en los resultados de ambos días.

12.5. UNIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado, se dan los valores únicos que se van a considerar característicos tras los ensayos realizados. Estos valores pueden diferir de otros obtenidos en condiciones climáticas distintas, como se puede comprobar respecto a los ensayos de otoño.

Estos resultados, serán útiles con la finalidad de hacer comparaciones con otras cocinas.

12.5.1. SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS (ASAE S580)

En este apartado se da un valor característico de la potencia útil, según dicha norma. Esta se considera la potencia útil característica de la cocina. Además se hace una representación de la potencia útil frente a la sobre-temperatura. Gracias a esa representación se puede obtener la potencia útil máxima, que se determina cuando la sobre-temperatura es cero.

Para obtener todos estos resultados, se representan todas las mediciones con la olla cargada y se realiza un ajuste lineal. A partir del ajuste lineal se obtiene el valor de la potencia útil según la norma, sobre-temperatura de 50 °C, y el de la potencia útil máxima.

A continuación se muestra el gráfico obtenido.

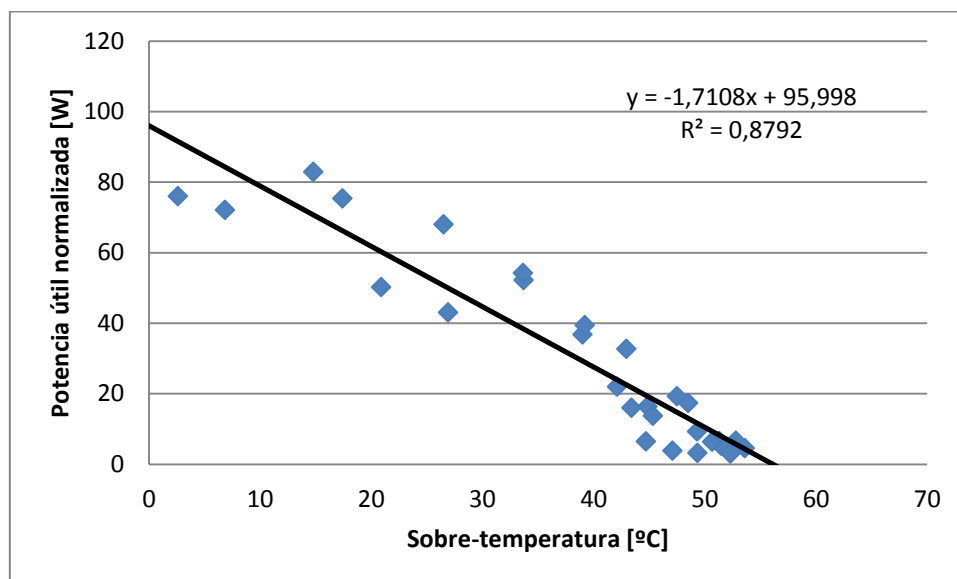


Gráfico 42. Potencia útil normalizada frente a sobre-temperatura en verano.

Con esto, obtenemos los valores anteriormente indicados.

$$P_{s,m\acute{a}xima} = 95,9 \text{ W}$$

$$P_{s,50^{\circ}\text{C}} = 10,5 \text{ W}$$

12.5.2. OFICINA DE NORMAS DE LA INDIA

En este apartado, se da un único valor para las figuras de mérito F_1 y F_2 .

12.5.2.1. Figura de mérito 1

Debido a que sólo se ha realizado un ensayo en las condiciones necesarias para el cálculo de F_1 , el valor obtenido anteriormente es el valor característico para la cocina.

$$F_1 = 0,029 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

12.5.2.2. Figura de mérito 2

Para calcular el valor característico de F_2 , se realiza la media de los valores obtenidos en los ensayos con la olla cargada. Así se obtiene el siguiente valor del parámetro F_2 .

$$F_2 = 0,193$$

12.5.3. DESARROLLO DE UN MODELO CERO-DIMENSIONAL

En este apartado, se da un único valor al tiempo característico de enfriamiento t_0 , al coeficiente de pérdidas AUF' y a la eficiencia óptica η_0 . La obtención del valor único es mediante la media de los valores obtenidos en los ensayos expuestos anteriormente.

12.5.3.1. Tiempo característico t_0

$$t_0 = 4739 \text{ s} \approx 1,32 \text{ h}$$

12.5.3.2. Coeficiente de pérdidas AUF'

$$AUF' = 1,515 \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$$

12.5.3.3. Eficiencia óptica η_0

$$\eta_0 = 0,266$$

13. CONCLUSIONES GENERALES

13.1. COMPARACIONES

En este apartado se realizan las comparaciones de los parámetros característicos obtenidos de los ensayos tanto de la misma cocina en las distintas condiciones climáticas como de la cocina Hot Pot con otras cocinas.

13.1.1. Comparación de los parámetros obtenidos en las distintas condiciones de ensayo para la cocina Hot Pot

En este apartado se realiza una comparación entre los parámetros característicos de la cocina obtenidos en las distintas condiciones climáticas. Los parámetros característicos considerados en la comparación son las **potencias útiles**, tanto máxima como característica, las **figuras de mérito** y la **eficiencia óptica**.

En la siguiente tabla se presentan estos parámetros.

	Ensayos de verano	Ensayos de otoño
Potencia útil máxima normalizada $P_{s,máxima}$ [W]	95,9	64,0
Potencia útil característica normalizada $P_{s,50^{\circ}C}$ [W]	10,5	17,4
F_1 [m ² ·K/W]	0,029	0,050
F_2 [-]	0,193	0,353
Eficiencia óptica η_0 [-]	0,266	0,425

En vista de esta comparación se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La potencia máxima es mayor en verano que en otoño. Esto es debido fundamentalmente a la mayor área de apertura de la cocina y a que cuando las temperaturas son bajas, las pérdidas por evaporación no son grandes.
- La potencia característica es menor en verano que en otoño debido a que en verano, una sobre-temperatura de 50 °C se sitúa muy cerca de la temperatura de estancamiento pero también de la de ebullición del agua. Las pérdidas por evaporación aumentan exponencialmente hasta la temperatura de ebullición, por ello en verano, las pérdidas son mayores y por tanto la potencia útil característica es menor.
- F_1 puede entenderse como una resistencia térmica a la temperatura de estancamiento, es por ello que en el caso de los ensayos de otoño, este parámetro es mejor, ya que, será más capaz de mantener la temperatura cercana a la de

estancamiento, probablemente a causa de una menor evaporación y condensación en la tapa de agua.

- Tanto F_2 como η_0 pueden ser analizadas conjuntamente ya que ambas representan una eficiencia. Como puede observarse en ambas durante los ensayos de otoño el resultado es mayor. Esto quiere decir que la cocina funciona más eficientemente con temperaturas ambiente bajas. Esto es debido principalmente a las pérdidas por evaporación, que como se ha indicado anteriormente son mucho mayores en los ensayos de verano. Los valores de este parámetro a sobre-temperaturas bajas en verano son más próximos a los de otoño.
- En los parámetros que hacen uso del área de apertura en su cálculo, ésta se ha obtenido como se indica en el Apartado 7.2. Esta es el área total de apertura, que puede diferir del área efectiva de apertura con lo que los parámetros pueden variar según se use el área total o el área efectiva para su cálculo.

13.1.2. Comparación de los parámetros obtenidos con respecto a otras cocinas

En este apartado se comparan los valores característicos de esta cocina con los valores obtenidos de distintos estudios de otros tipos de cocina. Los parámetros a comparar dependerán de los presentados en dichos estudios.

13.1.2.1. Cocina parabólica

En este apartado se hace uso de la caracterización llevada a cabo por Miguel Manchado Megía: “Caracterización de una cocina solar parabólica”. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III. 2010.

En el Apartado 4.2.1.2 se puede encontrar una pequeña introducción sobre las cocinas de concentración entre las que se encuentran las cocinas parabólicas.

A continuación se presenta la comparación entre dichas cocinas.

	Cocina Hot Pot verano	Cocina Hot Pot otoño	Cocina Parabólica verano
Potencia útil máxima normalizada $P_{s,máxima}$ [W]	95,9	64,0	699-750
F_1 [m ² ·K/W]	0,029	0,050	0,026
F_2 [-]	0,193	0,353	0,832
Eficiencia óptica η_0 [-]	0,266	0,425	0,763

En vista de esto, podemos hacer las siguientes anotaciones:

- Como se puede observar, las características de la cocina parabólica en cuanto a potencia y rendimiento, son mucho mejores que las de la cocina Hot Pot. Sin embargo, su uso y coste son muy diferentes.
- El único parámetro que mejora la cocina Hot Pot es la **figura de mérito F_1** , que llega incluso a duplicarse en los ensayos de otoño. Esto es debido principalmente a la propia forma de la olla, que dispone de un aislamiento térmico con el cobertor de vidrio en su parte baja y su situación, protegida del viento.
- En la cocina parabólica, la olla está en contacto directo con el aire en prácticamente toda su superficie, mientras que en la cocina Hot Pot, el cobertor de vidrio y el propio reflector limitan tanto el contacto del aire con la olla como las posibles rachas de viento.
- En cuanto a la forma de la cocina y su facilidad de almacenamiento, la cocina Hot Pot presenta una ventaja considerable al poder plegarse su reflector.

13.1.2.2. Cocina Primrose

En este apartado se hace uso de la caracterización llevada a cabo por Ana Pizarro Menayo: “Caracterización de la cocina solar Primrose”. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III. 2010.

La cocina Primrose es una mezcla de las cocinas de tipo panel y las cocinas de concentración. Su construcción se basa en una mesa con un orificio donde se introduce la olla. La parte inferior de la olla queda dentro de una cavidad que es parte de la mesa y funciona como cobertor. En la parte inferior de la mesa se sitúa un espejo cóncavo que hace de reflector.



Figura 29. Cocina Primrose. Detalle de cobertor inferior (derecha)

Fuente: Ana Pizarro Menayo: “Caracterización de la cocina solar Primrose”. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III. 2010.

A continuación se presenta la comparación entre dichas cocinas:

	Cocina Hot Pot verano	Cocina Hot Pot otoño	Cocina Primrose verano
F_1 [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]	0,029	0,050	0,012-0,044
Eficiencia óptica η_0 [-]	0,266	0,425	0,250

En este caso sólo se comparan estos dos parámetros debido a que el método de cálculo de otros parámetros era distinto o no se daba un valor único. En el caso de la eficiencia óptica, la de la cocina Primrose se calcula como un rendimiento obtenido de dividir la potencia de calentamiento entre la radiación por el área de apertura. Este método de cálculo es distinto al que se realiza en este estudio pero a pesar de ello, se realiza la comparación.

En vista de esto, podemos hacer las siguientes anotaciones:

- La primera **figura de mérito**, F_1 , tiene valores similares en ambas cocinas debido a que la forma de la olla en ambas cocinas es parecida. En ambas, la parte inferior está bajo la acción de un cobertor y la tapa queda expuesta al aire directamente sin los beneficios de un cobertor.
- En cuanto a la eficiencia óptica o rendimiento en las mismas condiciones, esto es en verano, se observan unos valores similares.

13.2. CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS

Como se puede observar a lo largo de todo este estudio, se han alcanzado los objetivos fijados.

El principal objetivo, la caracterización de la cocina, se ha alcanzado a lo largo de los Apartados del 6 al 12. En ellos se encuentran los sub-objetivos presentados, como son la caracterización con bajas temperaturas ambiente (otoño), la simulación en un mes cálido y la comprobación de la validez de los parámetros obtenidos, y por último, la caracterización con altas temperaturas ambiente (verano).

Otro de los objetivos consistía en la comparación con otras cocinas solares y ha sido alcanzado en el Apartado 13.1.

Por ello, se considera que todos los objetivos fijados han sido alcanzados.

13.3. TRABAJOS FUTUROS

Después de la experiencia obtenida en la realización de ensayos y el conocimiento de la cocina Hot Pot, a continuación se presentan algunas ideas que pueden ser tenidas en cuenta a la hora de realizar trabajos futuros:

- Mejora en el diseño de la olla que permita menor intercambio de calor de la tapa con el exterior con la introducción de un cobertor en la tapa y caracterización en estas condiciones.
- Estudio del área de apertura útil de la cocina y recálculo de los parámetros expuestos en este estudio. El objetivo es tratar de reducir las diferencias entre el ensayo de otoño y el de verano y/o, en su caso, detectar y diagnosticar mejor la causa de las diferencias, ya apuntadas en este estudio.
- Programas para la concienciación en el uso de dispositivos de cocina solar y mejora de los existentes en zonas poco desarrolladas con el fin de la eliminación del uso de la leña en la medida de lo posible.

14. BIBLIOGRAFÍA

DOCUMENTOS Y SITIOS WEB DE REFERENCIA

- Antonio Lecuona Neumann: ‘Fundamentos de cocinas solares’ (2012).
- Temas 4 y 5 de la asignatura ‘Energías Renovables’ impartida en tercer curso de Ingeniería Industrial por la Universidad Carlos III
- American Society of Agricultural Engineers, Testing and Reporting Solar Cooker Performance, ASAE S580, 2003.
- Bureau of Indian Standarts, Solar Cooker Box Type Specification, 2000.
- Roca, L., Miralles J.: ‘Perspectiva Ambiental’ (Fundació terra , nº 25, 2002).
- www.solarcooking.org
- Duffie, J.A., Beckman, W.A.: ‘Solar Engineering of Thermal Processes’ (4ª edición, 2013).

DOCUMENTOS Y SITIOS WEB DE INTERÉS

- Lecuona, A. ‘Las energías renovables como eje de lucha contra la pobreza en el mundo: perspectiva ética y social’. Energías renovables como instrumento de lucha contra la pobreza, Universidad Loyola Andalucía, Sevilla, 24 de noviembre de 2014.
- Miguel Manchado Megía: ‘Caracterización de una cocina solar parabólica’. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III. 2010.
- Ana Pizarro Menayo: ‘Caracterización de la cocina solar Primrose’. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III. 2010.
- <http://www.cocinasolar.org>
- ‘Photovoltaic Geographical Information System’, PVGIS
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>

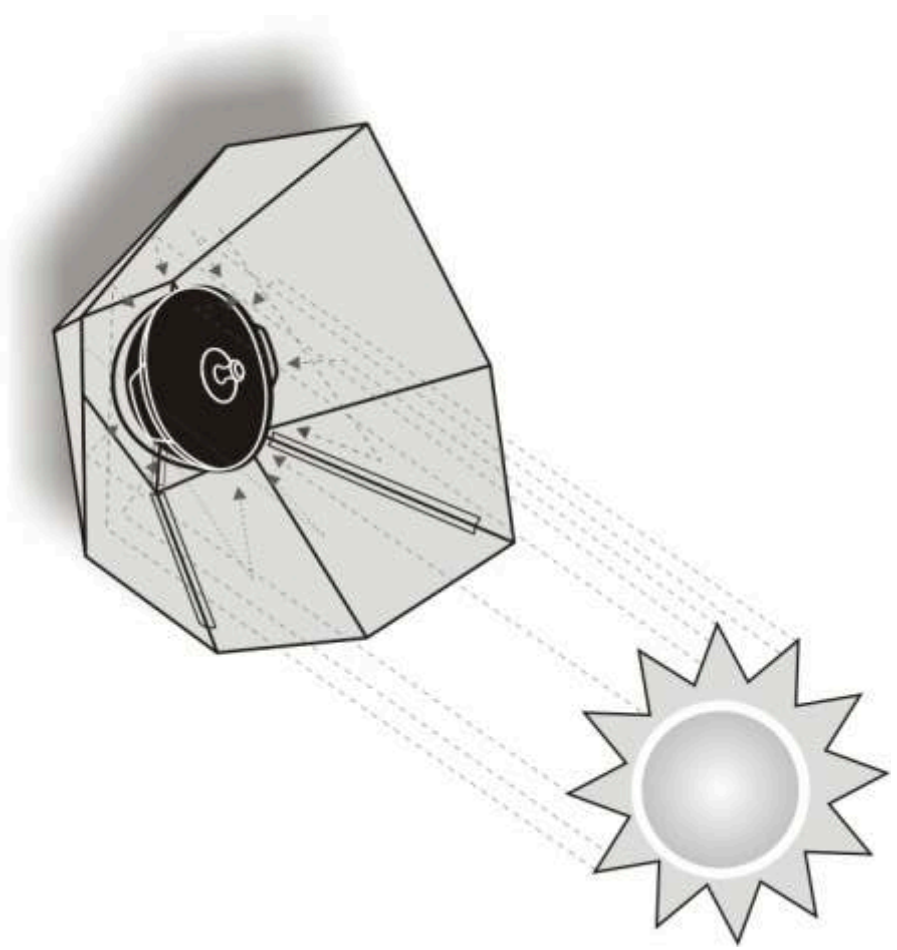
15. ANEXOS

ANEXO 1: GUÍA DE USUARIO DE LA COCINA HOT POT

A continuación se presenta la guía del usuario de la cocina solar Hot Pot.

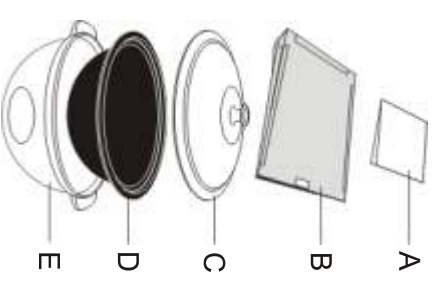
HotPot

User's Guide



Parts checklist

- A. User's guide
- B. Reflector
- C. Glass lid
- D. Black enameled steel pot
- E. Glass "Greenhouse"



Instructions for using your HotPot Solar Oven

This is the "HotPot", or "Tilenafa" as it is known in Mali, or "Olla Solar" as it is known in Mexico where it is manufactured by Energía Portátil S.A. de C.V. in Monterrey, Mexico. It is a durable, versatile and easy-to-use panel solar oven. We hope it will give you many years of delicious, environmentally friendly meals!

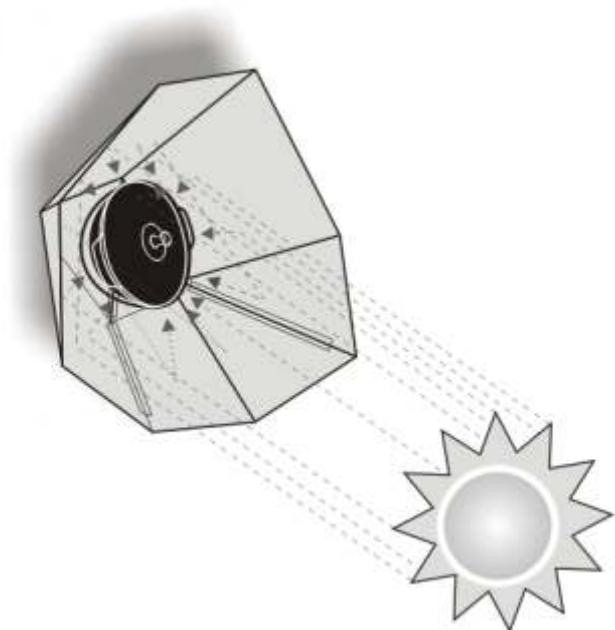
The HotPot was developed by Solar Household Energy, Inc. (www.she-inc.org) to provide an economical, healthy and environmentally friendly alternative to cooking with fuel wood and other biomass in developing countries. It will work equally well in developed countries with favorable climatic conditions.

Don't be discouraged if you have problems with the HotPot the first time. Like a sailboat, the performance of the HotPot depends on an ever-changing environment. It will take a little practice to get the "feel" for what it will do in different weathers. After that, it's smooth sailing.

Here's how the HotPot cooks

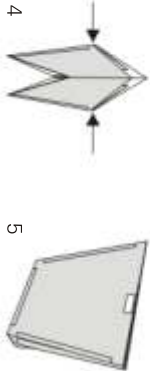
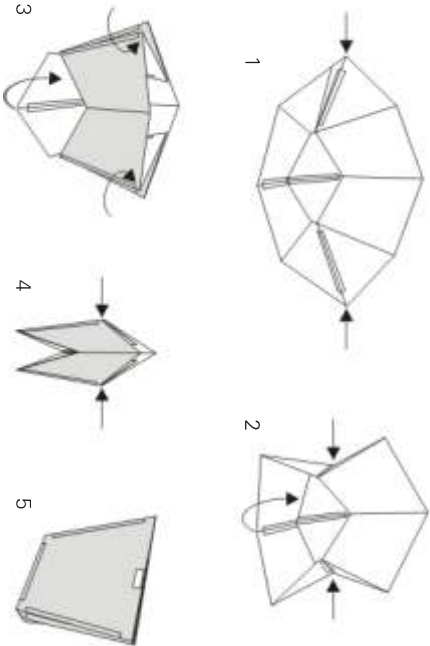
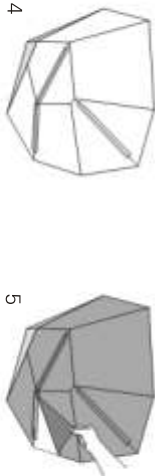
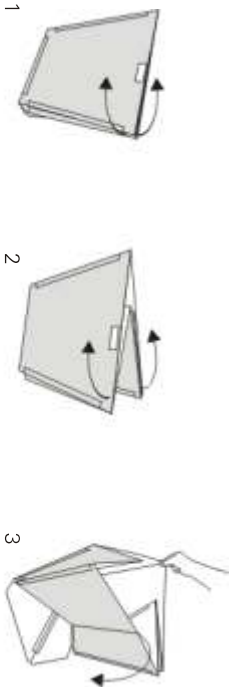
It is fueled uniquely by direct solar energy and by indirect solar energy from the reflector. The sun's rays penetrate the tempered glass "greenhouse" bowl, strike the 5-liter black enameled steel pot and convert to heat. The heat is retained around the pot by the greenhouse, achieving cooking temperatures.

Your HotPot is most efficient under a cloudless sky, in the shelter of cold winds, and between the hours of 10 AM and 4 PM. Ambient temperature has only slight impact on cooking performance. More important is the elevation of the sun in the sky. Higher is better. Therefore, in temperate zones, The HotPot will be most efficient in the summer, spring and fall.



The Reflector

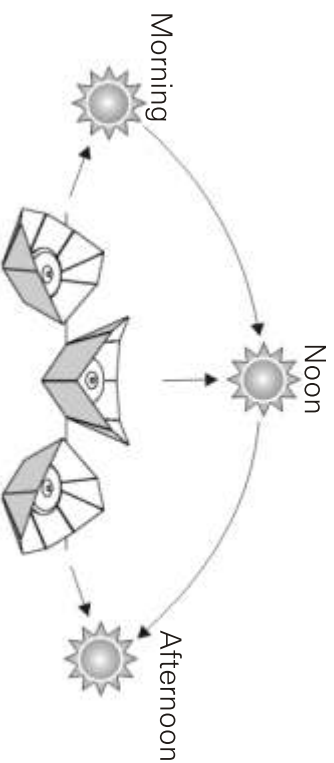
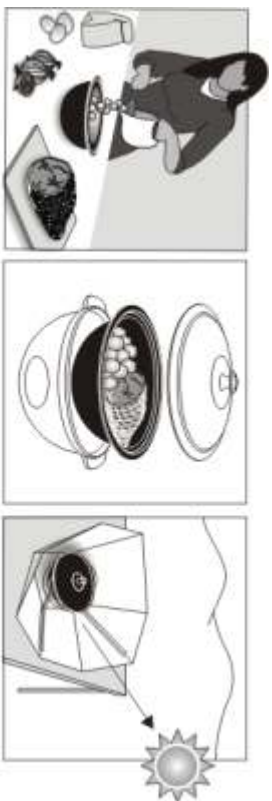
The HotPot comes with a durable hinged reflector designed for compact storage. Unfolding and folding it is easy once you've done it a few times. The illustration below will help you get the hang of it. Be sure to peel the protective plastic film off the reflector before exposing it to the sun! (Otherwise it will be difficult to remove.)



How to use the HotPot

Select a site that will not be shaded by trees or buildings during the course of the day. Deploy your reflector on an elevated surface or on the ground and orient the low side of the reflector to the sun. When you have loaded the pot with food, put it in the glass "greenhouse," cover it with the lid and place the pot assembly on the bottom panel of the reflector.

The performance of your HotPot depends on the reflector's orientation to the sun as it arcs across the sky. For maximum efficiency, an adjustment should be made each hour or so. In doing this it is well to "lead" the sun as you would a moving target. Should you wish to curtail cooking but keep food hot, aim the reflector a bit behind the sun. (Under a strong sun, you can simply aim the HotPot at where the sun will be at noon rather than make any adjustments during the cooking). With experience you will quickly learn what works best for you.




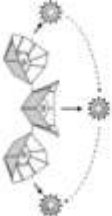



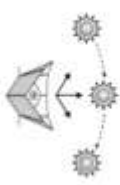









Cooking tips














As with any cooking device, cooking times in the HotPot will depend on what you are cooking. For example, most beans take longer than rice; large pieces cook more slowly than smaller ones. The higher the heat (the more intense the sunlight), the faster the food cooks.

- Little or no water is needed for this slower cooking. Liquid is created from the "sweating" of the food which renders the result more flavorful, since it is undiluted.
- There is no need to stir food during cooking. It will not carbonize and stick to the pot.
- There are differences in the preparation of certain foods:
 - ▶ Rice may be added to cold water at the start of cooking. As usual, use two cups of water to one cup of rice.
 - ▶ Soak dried beans in water the night before; drain and add fresh water.
 - ▶ Lentils do not need to be soaked (re-hydrated).
 - ▶ Eggs should be "hard boiled" without water.
 - ▶ There are two methods to bake bread or cake: The black pot itself can be used as the form. Or, another form may be placed inside the black pot. (Grease and pre-heat the black pot while preparing the batter or the dough.)
 - ▶ Potatoes in their jackets can be pierced with a fork and baked without water. (Throw in a sprig of thyme or rosemary.)
 - ▶ Chickens can be stuffed with onion, rubbed with herbs and baked without water or oil. (A splash of wine adds flavor.)
- The HotPot cannot fry foods. (Solar frying can only be accomplished with paraboloid solar ovens.)
- Cooking times. Here are some broad guidelines:
 - 1-2 hrs: Soups, eggs, rice, fish, vegetables, fruit
 - 3-4 hrs: potatoes, some beans, meats, stews, bread
 - 4-8 hrs: dry beans (not re-hydrated), large roasts.

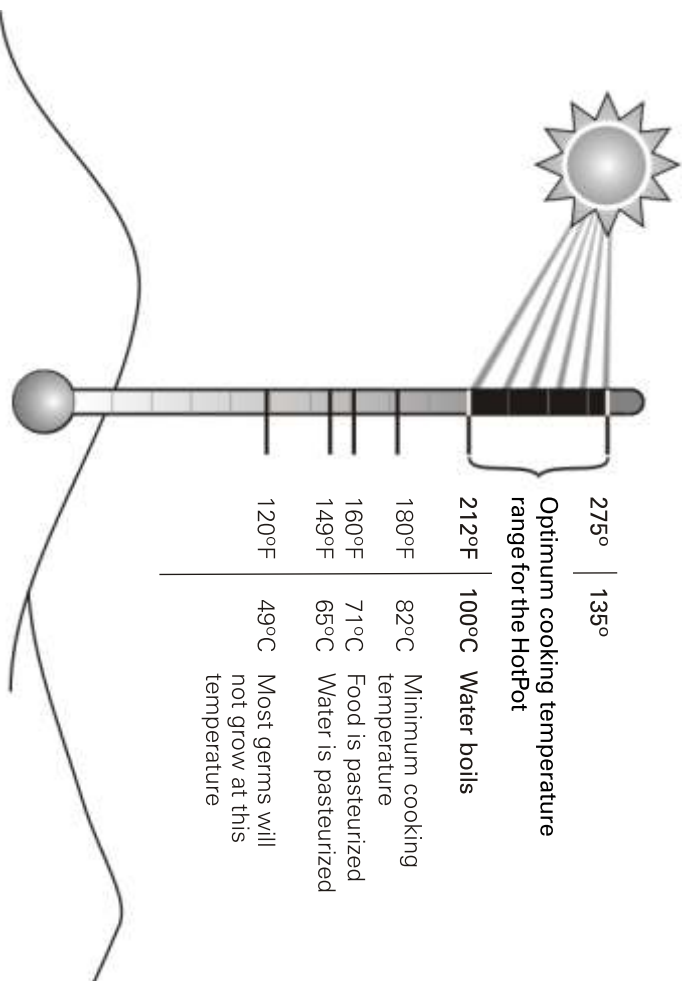
Factors that affect the speed of the cooking

	Fast	Slow	
	 Food's size  Food's quantity  Water used for cooking  Reorienting the reflector	   	
Season and hour of the day (by the length of shadow)			No cooking
Clouds or dust			
Wind			
			

Time needed to cook 9 pounds in a sunny day

Fast 1 or 2 hours	Medium 3 or 4 hours	Slow 5 to 8 hours
 Eggs	 Soups	 Beans and lentils (dry)
 Rice	 Potatoes	
 Fish	 Beans (soaked)	
 Most vegetables	 Meat	 Big roasts
 Fruit	 Bread	
	 Vegetables (roots)	

Temperatures



Caution!

Although the HotPot is a very safe device, it can cause burns if not handled prudently. The hottest component is the black steel pot. The glass greenhouse may also be hot.

- The tempered glass greenhouse bowl is strong, but it could break with rough treatment. Try not to drop it.
- The pot is made of enameled steel; it could chip if mishandled.

Caring for your HotPot

The greenhouse and steel pot can be cleaned in the same manner as conventional cooking vessels. Cleaning the pot is easy and requires no special care.

To avoid scratching the reflector, if you spill food on it, clean promptly with a soft cloth and abundant water. To clean the whole reflector splash a very diluted solution of dishwashing soap (one drop per gallon) and allow to drip dry.

Solar cooking resources

The Solar Cooking Archive,
<http://solarcooking.org/recipes/Introduction.htm>
is a good source of recipes. It also has a selection of solar cook books for sale at <http://solarcooking.org/books.htm>

ANEXO 2: PONENCIA DEL PROFESOR ANTONIO LECUONA

Este anexo presenta parte de la ponencia “Las cocinas solares como herramienta de lucha contra la pobreza energética” realizada por el profesor Antonio Lecuona en el 9º Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica, 4 de junio en Cartagena.

En el extracto presentado, se hace referencia a parte de este Proyecto de Fin de Carrera.

Ensayo de las cocinas solares

Resultados obtenidos en ITEA-UCC3M Cocina HOT-POT (PFC de David Fernández Juárez):



Área de apertura media Julio [m ²]	Masa de agua [kg]	Tiempo característico de enfriamiento t ₀ [s]	Coefficiente de pérdidas $F'A U_e$ [W K ⁻¹]; w = 0	Eficiencia óptica η_o [-]
0,436	1,53	6.509	1,18	0,425

$G_{b,n,max}$ [W m ⁻²]	T_a [°C]	Potencia útil máxima \dot{Q}_{max} [W]	Potencia útil característica $\dot{Q}_{50^\circ C}$ [W]	$T_{st} - T_a$ [K]
1.020	31	157	77	160



ANEXO 3: APARATOS USADOS EN LOS ENSAYOS

En este anexo se presentan los aparatos más importantes que se han usado para realizar las mediciones durante los ensayos.

- Dosímetro de radiación Mac-Solar (SLM018c-2)

Usado para medir la radiación solar



Figura 30. Vista frontal y trasera del dosímetro de radiación

Fuente propia

- Termómetro Dual K7J7T7S7E AZ 8856

Permite medir la temperatura en dos canales con distintos tipos de termopares.



Figura 31. Vista frontal de los termómetros.

- Termopar de tipo K

En conjunción con el termómetro, permite medir temperaturas.

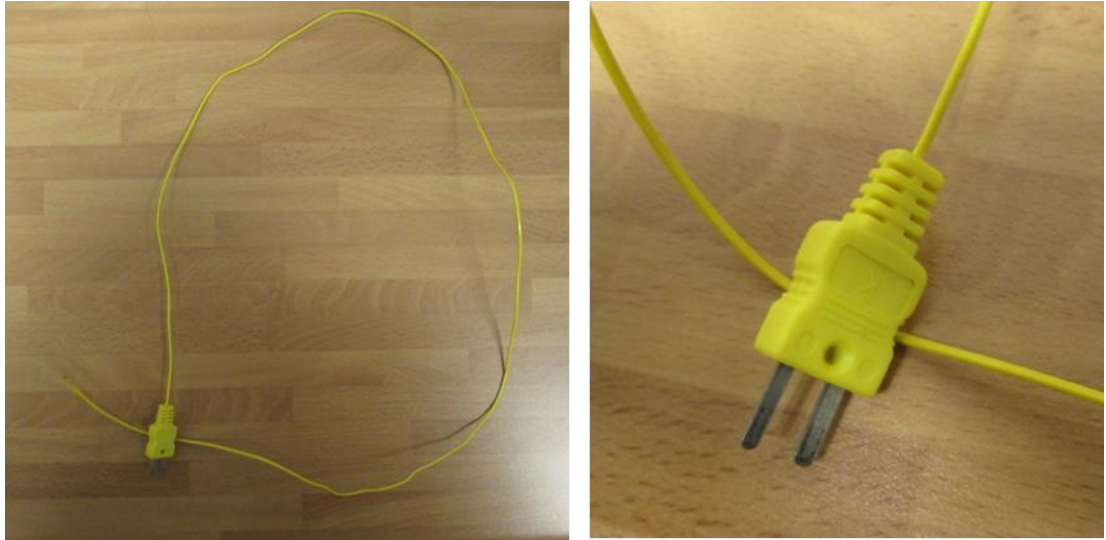


Figura 32. Termopar de tipo K.

Fuente propia

ANEXO 4: DATOS USADOS EN LA SIMULACIÓN

En este anexo se presentan las tablas obtenidas de PVGIS que son utilizadas para la simulación. En ellas se resaltan los valores usados.

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Location: 40°20'3" North, 3°45'53" West, Elevation: 671 m a.s.l.,

Inclination of plane: 20 deg.

Orientation (azimuth) of plane: -30 deg.

Radiation estimates

Time	G	Gd	Td
04:52	0	0	18.2
05:07	20	16	18.2
05:22	43	25	18.3
05:37	83	41	18.4
05:52	126	52	18.7
06:07	175	63	19.0
06:22	228	74	19.3
06:37	283	84	19.7
06:52	340	93	20.2
07:07	397	101	20.7
07:22	454	109	21.3
07:37	510	115	21.8
07:52	565	121	22.4
08:07	618	126	23.0
08:22	669	130	23.6
08:37	717	134	24.2
08:52	762	137	24.7
09:07	805	139	25.3
09:22	843	141	25.7
09:37	879	142	26.2
09:52	910	143	26.6
10:07	938	143	27.0
10:22	961	143	27.4
10:37	981	143	27.8
10:52	996	143	28.1
11:07	1010	142	28.4
11:22	1010	141	28.7
11:37	1020	141	29.0
11:52	1010	140	29.2
12:07	1010	139	29.5
12:22	998	138	29.8
12:37	984	137	30.0
12:52	966	136	30.2
13:07	944	135	30.4
13:22	918	133	30.6
13:37	888	132	30.8
13:52	855	130	31.0
14:07	819	128	31.2
14:22	779	126	31.3
14:37	737	124	31.4
14:52	692	121	31.5
15:07	645	118	31.6
15:22	595	115	31.6
15:37	544	111	31.7
15:52	491	106	31.7

16:07	438	101	31.7
16:22	384	96	31.6
16:37	330	90	31.5
16:52	277	83	31.4
17:07	226	76	31.2
17:22	176	68	31.0
17:37	129	60	30.8
17:52	86	52	30.5
18:07	48	44	30.1
18:22	56	56	29.8
18:37	47	46	29.3
18:52	37	37	-
19:07	27	27	-

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

Td: Average daytime temperature profile (deg. C)

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Location: 40°20'3" North, 3°45'53" West, Elevation: 671 m a.s.l.,

Inclination of plane: 20 deg.

Orientation (azimuth) of plane: -15 deg.

Radiation estimates

Time	G	Gd	Td
04:52	0	0	18.2
05:07	16	16	18.2
05:22	24	22	18.3
05:37	54	35	18.4
05:52	89	46	18.7
06:07	132	56	19.0
06:22	180	66	19.3
06:37	231	76	19.7
06:52	285	84	20.2
07:07	340	93	20.7
07:22	396	100	21.3
07:37	452	107	21.8
07:52	508	113	22.4
08:07	562	119	23.0
08:22	614	124	23.6
08:37	665	128	24.2
08:52	713	131	24.7
09:07	758	134	25.3
09:22	801	136	25.7
09:37	840	138	26.2
09:52	875	139	26.6
10:07	907	140	27.0
10:22	935	141	27.4
10:37	959	141	27.8
10:52	979	141	28.1
11:07	995	141	28.4
11:22	1010	141	28.7
11:37	1010	140	29.0
11:52	1020	140	29.2
12:07	1020	140	29.5
12:22	1010	139	29.8
12:37	1000	139	30.0
12:52	989	138	30.2
13:07	971	137	30.4
13:22	949	136	30.6
13:37	924	135	30.8
13:52	894	134	31.0
14:07	862	133	31.2
14:22	825	131	31.3
14:37	786	129	31.4
14:52	743	127	31.5
15:07	698	124	31.6
15:22	650	121	31.6
15:37	600	117	31.7
15:52	548	113	31.7

16:07	495	108	31.7
16:22	441	103	31.6
16:37	386	97	31.5
16:52	332	90	31.4
17:07	278	83	31.2
17:22	226	76	31.0
17:37	176	68	30.8
17:52	129	59	30.5
18:07	86	50	30.1
18:22	50	42	29.8
18:37	47	46	29.3
18:52	37	37	-
19:07	27	27	-

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

Td: Average daytime temperature profile (deg. C)

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Location: 40°20'3" North, 3°45'53" West, Elevation: 671 m a.s.l.,

Inclination of plane: 20 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

Radiation estimates

Time	G	Gd	Td
04:52	0	0	18.2
05:07	16	16	18.2
05:22	27	27	18.3
05:37	37	37	18.4
05:52	53	39	18.7
06:07	89	48	19.0
06:22	131	58	19.3
06:37	178	67	19.7
06:52	229	76	20.2
07:07	282	84	20.7
07:22	336	92	21.3
07:37	391	99	21.8
07:52	447	105	22.4
08:07	501	111	23.0
08:22	555	116	23.6
08:37	607	120	24.2
08:52	658	124	24.7
09:07	706	128	25.3
09:22	751	130	25.7
09:37	793	133	26.2
09:52	833	134	26.6
10:07	869	136	27.0
10:22	901	137	27.4
10:37	930	138	27.8
10:52	955	139	28.1
11:07	976	139	28.4
11:22	993	139	28.7
11:37	1010	140	29.0
11:52	1010	140	29.2
12:07	1020	140	29.5
12:22	1020	140	29.8
12:37	1010	140	30.0
12:52	1010	140	30.2
13:07	993	139	30.4
13:22	976	139	30.6
13:37	955	139	30.8
13:52	930	138	31.0
14:07	901	137	31.2
14:22	869	136	31.3
14:37	833	134	31.4
14:52	793	133	31.5
15:07	751	130	31.6
15:22	706	128	31.6
15:37	658	124	31.7
15:52	607	120	31.7

16:07	555	116	31.7
16:22	501	111	31.6
16:37	447	105	31.5
16:52	391	99	31.4
17:07	336	92	31.2
17:22	282	84	31.0
17:37	229	76	30.8
17:52	178	67	30.5
18:07	131	58	30.1
18:22	89	48	29.8
18:37	53	39	29.3
18:52	37	37	-
19:07	27	27	-

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

Td: Average daytime temperature profile (deg. C)

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Location: 40°20'3" North, 3°45'53" West, Elevation: 671 m a.s.l.,

Inclination of plane: 20 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 15 deg.

Radiation estimates

Time	G	Gd	Td
04:52	0	0	18.2
05:07	16	16	18.2
05:22	27	27	18.3
05:37	37	37	18.4
05:52	47	46	18.7
06:07	50	42	19.0
06:22	86	50	19.3
06:37	129	59	19.7
06:52	176	68	20.2
07:07	226	76	20.7
07:22	278	83	21.3
07:37	332	90	21.8
07:52	386	97	22.4
08:07	441	103	23.0
08:22	495	108	23.6
08:37	548	113	24.2
08:52	600	117	24.7
09:07	650	121	25.3
09:22	698	124	25.7
09:37	743	127	26.2
09:52	786	129	26.6
10:07	825	131	27.0
10:22	862	133	27.4
10:37	894	134	27.8
10:52	924	135	28.1
11:07	949	136	28.4
11:22	971	137	28.7
11:37	989	138	29.0
11:52	1000	139	29.2
12:07	1010	139	29.5
12:22	1020	140	29.8
12:37	1020	140	30.0
12:52	1010	140	30.2
13:07	1010	141	30.4
13:22	995	141	30.6
13:37	979	141	30.8
13:52	959	141	31.0
14:07	935	141	31.2
14:22	907	140	31.3
14:37	875	139	31.4
14:52	840	138	31.5
15:07	801	136	31.6
15:22	758	134	31.6
15:37	713	131	31.7
15:52	665	128	31.7

16:07	614	124	31.7
16:22	562	119	31.6
16:37	508	113	31.5
16:52	452	107	31.4
17:07	396	100	31.2
17:22	340	93	31.0
17:37	285	84	30.8
17:52	231	76	30.5
18:07	180	66	30.1
18:22	132	56	29.8
18:37	89	46	29.3
18:52	54	35	-
19:07	24	22	-

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

Td: Average daytime temperature profile (deg. C)

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Location: 40°20'3" North, 3°45'53" West, Elevation: 671 m a.s.l.,

Inclination of plane: 20 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 30 deg.

Radiation estimates

Time	G	Gd	Td
04:52	0	0	18.2
05:07	16	16	18.2
05:22	27	27	18.3
05:37	37	37	18.4
05:52	47	46	18.7
06:07	56	56	19.0
06:22	48	44	19.3
06:37	86	52	19.7
06:52	129	60	20.2
07:07	176	68	20.7
07:22	226	76	21.3
07:37	277	83	21.8
07:52	330	90	22.4
08:07	384	96	23.0
08:22	438	101	23.6
08:37	491	106	24.2
08:52	544	111	24.7
09:07	595	115	25.3
09:22	645	118	25.7
09:37	692	121	26.2
09:52	737	124	26.6
10:07	779	126	27.0
10:22	819	128	27.4
10:37	855	130	27.8
10:52	888	132	28.1
11:07	918	133	28.4
11:22	944	135	28.7
11:37	966	136	29.0
11:52	984	137	29.2
12:07	998	138	29.5
12:22	1010	139	29.8
12:37	1010	140	30.0
12:52	1020	141	30.2
13:07	1010	141	30.4
13:22	1010	142	30.6
13:37	996	143	30.8
13:52	981	143	31.0
14:07	961	143	31.2
14:22	938	143	31.3
14:37	910	143	31.4
14:52	879	142	31.5
15:07	843	141	31.6
15:22	805	139	31.6
15:37	762	137	31.7
15:52	717	134	31.7

16:07	669	130	31.7
16:22	618	126	31.6
16:37	565	121	31.5
16:52	510	115	31.4
17:07	454	109	31.2
17:22	397	101	31.0
17:37	340	93	30.8
17:52	283	84	30.5
18:07	228	74	30.1
18:22	175	63	29.8
18:37	126	52	29.3
18:52	83	41	-
19:07	43	25	-

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

G_d: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

T_d: Average daytime temperature profile (deg. C)